

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Da análise empírica à simulação espacial: modelagem da dinâmica e
crescimento compensatório em povoamentos florestais**

Pedro Alves Marques
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

PEDRO ALVES MARQUES

**Da análise empírica à simulação espacial: modelagem da dinâmica e
crescimento compensatório em povoamentos florestais**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Helio Garcia Leite

Coorientador: Márcio L. R. de Oliveira

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Marques, Pedro Alves, 1996-
M357d Da análise empírica à simulação espacial: modelagem da
2026 dinâmica e crescimento compensatório em povoamentos
florestais / Pedro Alves Marques. – Viçosa, MG, 2026.
1 dissertação eletrônica (95 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Hélio Garcia Leite.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2026.
Inclui bibliografia.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.484>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Crescimento - Efeito da mortalidade.
2. Competição (Biologia). I. Leite, Hélio Garcia, 1960-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal.
III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.98152

PEDRO ALVES MARQUES

Da análise empírica à simulação espacial: modelagem da dinâmica e crescimento compensatório em povoamentos florestais

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de julho de 2026.

Assentimento:

Pedro Alves Marques
Autor

Helio Garcia Leite
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 28/08/2026 às 15:54:07 e pelo orientador em 28/08/2026 às 17:15:36. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **R7WU.D84M.HMF5** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e, de modo especial, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela oportunidade de realização deste mestrado e pela excelência de sua estrutura humana e acadêmica.

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), instituição onde me formei e dei os primeiros passos da minha trajetória acadêmica e profissional.

Ao meu orientador, Professor Helio Garcia Leite, pelo voto de confiança, pela visão inovadora e pelo dinamismo constante que impulsionaram o desenvolvimento deste trabalho. Suas ideias foram fundamentais para a maturidade desta pesquisa.

Ao meu coorientador, Professor Marcio Leles Romarco de Oliveira, cujo apoio estende-se desde a graduação. Expresso minha profunda gratidão pela continuidade desta parceria e por ser uma referência perene em minha formação.

A todos os docentes que fizeram parte da minha trajetória, pelo empenho no ensino, pela partilha do conhecimento e pela dedicação à minha formação.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação, Dilson e Alexandre, pela constante presteza e auxílio burocrático.

Ao Francisco (Chiquinho), zelador do Departamento de Engenharia Florestal (DEF), pelas mensagens, reflexões e pelos momentos de descontração que tornaram a rotina mais leve.

Aos colaboradores responsáveis pela limpeza e manutenção das instalações do DEF, cujo trabalho garantiu um ambiente harmonioso e acolhedor para o desenvolvimento desta jornada.

Aos companheiros dos grupos de estudo GEMMF, M3F e GAPGtF, bem como aos colegas de laboratório Ana, Pablo, Pedro, Ramon e Silas, pelo aprendizado compartilhado e pelo companheirismo diário.

À minha mãe, Eugênia, pelo suporte incondicional que me permitiu acreditar e perseguir meus objetivos, sendo a base fundamental de toda a minha trajetória.

À minha irmã, Gabriela, pela amizade constante e pela presença sempre encorajadora ao longo desta jornada acadêmica.

À minha noiva, Luiana, pelo companheirismo e pela compreensão diante das exigências e do cotidiano intenso que compartilhamos ao longo destes anos de dedicação ao mestrado.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, manifesto meu sincero agradecimento.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de

pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“Acordar primeiro pra realizar o sonho é a ciência”
(Black Alien)

RESUMO

MARQUES, Pedro Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2026. **Da análise empírica à simulação espacial: modelagem da dinâmica e crescimento compensatório em povoamentos florestais.** Orientador: Helio Garcia Leite. Coorientador: Márcio Leles Romarco de Oliveira.

Esta dissertação tem como objetivo compreender a dinâmica espaço-temporal da competição e do crescimento compensatório em plantios clonais de *Eucalyptus* e *Corymbia*, partindo do pressuposto de que a mortalidade atua como um evento de redistribuição de recursos. O trabalho se propõe a avaliar como a mortalidade adjacentes altera as trajetórias de crescimento das árvores remanescentes, isolar a capacidade produtiva do macroambiente e transpor esse conhecimento biométrico para o desenvolvimento de um simulador web espacialmente explícito. A pesquisa foi estruturada em dois capítulos interdependentes. O primeiro consiste em uma análise empírica baseada em dados de inventário florestal contínuo, englobando a avaliação da dinâmica estrutural por meio de distribuições de frequência (histogramas) e o ajuste de trajetórias médias para o diâmetro, a altura e o volume pelo modelo log-linearizado de Schumacher, aliados à modelagem da competição mediante regressão espacial não paramétrica (LOESS), formulação de um Fator de Liberação Espaço-Temporal (FLET) e Modelos Lineares de Efeitos Mistos (LMM). Os resultados evidenciam que o crescimento compensatório possui uma divergência alométrica, priorizando o incremento em diâmetro, enquanto o crescimento em altura permanece pouco alterado. Além disso, comprovou-se que a capacidade de crescimento secundário é restrita aos indivíduos dos estratos dominantes e condicionada pela capacidade produtiva do sítio. O segundo capítulo corresponde ao desenvolvimento e validação do ForestSIM, um simulador florestal dinâmico estruturado em nuvem. Foram utilizados o Índice de Pressão de Vizinhança (IPV), algoritmos de otimização matemática e simulações estocásticas de Monte Carlo para avaliar múltiplos cenários de distúrbio. Os resultados demonstram que o sistema transpõe com êxito o crescimento compensatório do nível local (árvore individual) para a escala de área, permitindo quantificar a resiliência produtiva do povoamento frente a diferentes cenários de mortalidade. Evidenciou-se que a resiliência produtiva da floresta é governada pela intensidade, idade de ocorrência e distribuição espacial dos distúrbios. O simulador atestou que perdas precoces de até 10% são quase totalmente amortecidas pelo povoamento. Em contrapartida, falhas com dispersão agregada (reboleiras) ou mortalidade de fase tardia anulam a compensação e comprometem

o

rendimento muito mais do que perdas aleatórias de mesma magnitude. De modo geral, os achados reforçam a necessidade de abordagens dependentes da distância e entregam aos gestores uma ferramenta preditiva focada em avaliar a capacidade de amortecimento do povoamento, subsidiando o manejo de riscos e a silvicultura de precisão.

Palavras-chave: crescimento compensatório; competição intraespecífica; mortalidade regular; Fator de Liberação Espaço-Temporal; modelos lineares de efeitos mistos

ABSTRACT

MARQUES, Pedro Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2026. **From empirical analysis to spatial simulation: dynamics and compensatory growth in forest stands.** Adviser: Helio Garcia Leite. Co-adviser: Márcio Leles Romarco de Oliveira.

This dissertation aims to understand the spatiotemporal dynamics of competition and compensatory growth in *Eucalyptus* and *Corymbia* clonal plantations, based on the assumption that mortality acts as a resource redistribution event. The study proposes to evaluate how adjacent mortality alters the growth trajectories of the remaining trees, isolate the productive capacity of the macroenvironment, and transpose this biometric knowledge into the development of a spatially explicit web simulator. The research was structured into two interdependent chapters. The first consists of an empirical analysis based on continuous forest inventory data, encompassing the evaluation of structural dynamics through frequency distributions (histograms) and the fitting of average trajectories for diameter, height, and volume using the loglinearized Schumacher model. This was combined with competition modeling through nonparametric spatial regression (LOESS), the formulation of a Spatiotemporal Release Factor (FLET), and Linear Mixed Effects Models (LMM). The results show that compensatory growth exhibits an allometric divergence, prioritizing diameter increment, while height growth remains largely unchanged. Furthermore, it was proven that the capacity for secondary growth is restricted to individuals in the dominant strata and conditioned by the productive capacity of the site. The second chapter corresponds to the development and validation of ForestSIM, a cloud based dynamic forest simulator. The Neighborhood Pressure Index (NPI), mathematical optimization algorithms, and stochastic Monte Carlo simulations were used to evaluate multiple disturbance scenarios. The results demonstrate that the system successfully transposes compensatory growth from the local level (individual tree) to the area scale, allowing the quantification of the stand's productive resilience in the face of different mortality scenarios. It was evidenced that the productive resilience of the forest is governed by the intensity, age of occurrence, and spatial distribution of the disturbances. The simulator attested that early losses of up to 10% are almost entirely buffered by the stand. In contrast, gaps with aggregated dispersion (patches) or late stage mortality nullify the compensation and compromise the yield much more than random losses of the same magnitude. Overall, the findings reinforce the need for distance dependent approaches and provide managers with a predictive

tool focused on evaluating the stand's buffering capacity, supporting risk management and precision forestry.

Keywords: compensatory growth; intraspecific competition; regular mortality; Spatiotemporal Release Factor; linear mixed-effects models

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
OBJETIVO GERAL	15
Objetivos específicos	15
CAPÍTULO 1. DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO CRESCIMENTO	
COMPENSATÓRIO EM PLANTIOS CLONAIIS DE <i>Eucalyptus</i> E <i>Corymbia</i>	16
1. INTRODUÇÃO	17
2. MATERIAL E MÉTODOS	19
2.1. Área de estudo e base de dados florestais	19
2.2. Tratamento de dados e estratificação	21
2.2.1. Consolidação da base de dados	21
2.2.2. Classificação da capacidade produtiva	21
2.2.3. Mapeamento espacial	23
2.2.4. Mortalidade regular	24
2.3. Definição do status de competição e análise espacial	24
2.3.1. Superfície de probabilidade de falhas: abordagem não paramétrica	25
2.3.2. Integração espaço-temporal da mortalidade	25
2.4. Dinâmica espaço-temporal da mortalidade	27
2.5. Análise exploratória do crescimento compensatório	28
2.6. Modelagem de crescimento	29
2.6.1. Modelagem base de trajetória média	29
2.6.2. Modelagem preditiva de efeitos mistos	29
3. RESULTADOS	31
3.1. Dinâmica estrutural do povoamento	31
3.2. Trajetórias médias de crescimento	38
3.3. Dinâmica espaço-temporal da mortalidade e liberação competitiva	41
3.4. Mapeamento espacial da mortalidade e crescimento compensatório intraparcela	43
3.5. Modelagem preditiva de efeitos mistos	45
4. DISCUSSÃO	52
4.1. Dinâmica estrutural do povoamento: a estagnação das classes inferiores	52
4.2. Dinâmica espaço-temporal da mortalidade: a influência da capacidade produtiva	52

4.3. Alometria da resposta compensatória: priorização da expansão cambial	53
4.4. Capacidade produtiva do sítio como moduladora da resiliência volumétrica .	54
4.5. Hierarquia social e a dualidade da resposta: liberação das dominantes e supressão das inferiores	54
4.6. Avanços metodológicos na modelagem de vizinhança: LMM e dinâmica transiente	56
4.7. Implicações silviculturais e limitações do estudo	56
5. CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS.....	59
CAPÍTULO 2. <i>FORESTSIM</i> : CONCEPÇÃO, ARQUITETURA E APLICAÇÃO DE UM SIMULADOR <i>WEB</i> ESPACIALMENTE EXPLÍCITO PARA O MANEJO FLORESTAL	63
1. INTRODUÇÃO	64
2. MODELO CONCEITUAL DO SIMULADOR	65
2.1. Abstração do ambiente florestal	67
2.2. Módulo de inicialização biométrica.....	67
2.3. Módulo de competição espacial	68
2.4. Módulo de mortalidade estocástica	69
2.5. Módulos de projeção de crescimento e resiliência	70
2.5.1. Projeção diamétrica e resiliência espacial	70
2.5.2. Projeção da altura total	71
3. MATERIAL E MÉTODOS	71
3.1. Linguagem de Programação Python	72
3.2. Estrutura de interface <i>web</i>	72
3.3. Algoritmos de otimização	73
3.4. Manipulação e visualização de dados.....	73
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1. O sistema desenvolvido	74
4.1.1. Configuração do cenário	75
4.1.2. Saídas e acompanhamento do sistema	78
4.1.2.1. Métricas de síntese e demografia	78
4.1.2.2. Esforço de crescimento e otimização do fator compensatório	79
4.1.2.3. Evolução dendrométrica e transição de classes	80
4.1.2.4. Mapeamento espacial	82

4.1.2.5. Exportação de dados transversais.....	83
4.2. Estudo de caso: predição da resiliência produtiva sob múltiplos cenários de perturbação	84
4.2.1. Dinâmica alométrica e a resposta compensatória individual	84
4.2.2. Limites biológicos de suporte e saturação do vazio ecológico.....	85
4.2.3. Resiliência produtiva e a captura do risco estocástico.....	86
5. CONCLUSÕES	88
REFERÊNCIAS.....	89
CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS GERAIS	94

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por biomassa, energia e bioprodutos consolidou os plantios florestais de rápido crescimento como pilares estratégicos para o suprimento industrial de base renovável (FAO, 2022). Nesse cenário, o cultivo intensivo de espécies e híbridos dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* atingiu patamares de produtividade sem precedentes no contexto dos plantios florestais tropicais e subtropicais, fundamentados no aprimoramento genético e em práticas silviculturais de precisão (GONÇALVES *et al.*, 2013; RESENDE, 2019). Contudo, para que a eficiência produtiva seja maximizada ao longo de toda a rotação, o manejo florestal requer a compreensão dos processos ecofisiológicos e interações biofísicas que governam o desenvolvimento do povoamento desde o fechamento do dossel até a colheita final (FORRESTER, 2019; RESENDE, 2019; SCHWERZ *et al.*, 2020).

A dinâmica de crescimento de uma floresta equiânea é regulada pela capacidade de suporte do sítio, que estabelece os limites máximos de ocupação e produção do povoamento ao longo do tempo (OLIVER; LARSON, 1996). Com o avanço cronológico do povoamento, a sobreposição das copas e a expansão dos sistemas radiculares intensificam a disputa por recursos finitos, como radiação solar, água e nutrientes. Essa limitação inicia o processo de competição intraespecífica, que, em sua natureza, atua de forma assimétrica (WEINER, 1990). Ocorre, então, uma hierarquia de dominância entre os indivíduos, na qual árvores de maior porte limitam a disponibilidade de recursos no microambiente, monopolizando insumos essenciais e impondo condições competitivas mais intensas às árvores menores (WEINER, 1990; BINKLEY, 2004; PRETZSCH, 2009). A exclusão competitiva conduz à supressão e à mortalidade regular, um fenômeno intrínseco de autodesbaste que reconfigura continuamente a estrutura horizontal e vertical da floresta (PRETZSCH, 2009).

Do ponto de vista da ecologia da produção, a mortalidade florestal não representa unicamente uma perda de estoque; ela atua como um evento de redistribuição de recursos: luz, água, nutrientes e espaço físico, para os indivíduos sobreviventes adjacentes (FORRESTER, 2019). A morte de uma árvore libera um espaço, promovendo a disponibilização de recursos no micro-sítio adjacente. As árvores sobreviventes ao redor dessa área podem reagir a esse alívio competitivo acelerando suas taxas de acúmulo de biomassa, caracterizando o fenômeno do crescimento compensatório (BINKLEY *et al.*, 2010; FORRESTER, 2019). Estudos

demonstram que a magnitude dessa resposta é altamente contextual: Forrester et al. (2013) observaram que o incremento em área basal individual de árvores dominantes e codominantes aumentou significativamente após desbaste, com respostas absolutas e relativas mais pronunciadas em sítios mais produtivos e em povoamentos com distribuições diamétricas negativamente assimétricas. Chin et al. (2023) alertam, contudo, que a mortalidade natural pode tanto liberar quanto suprimir o crescimento de vizinhos, dependendo do contexto espacial e estrutural. A magnitude dessa resiliência produtiva é, portanto, a chave para determinar a capacidade do povoamento de amortecer perdas precoces ou tardias, mas sua quantificação permanece um desafio científico.

Historicamente, o manejo e o planejamento florestal têm se apoiado em modelos de crescimento e produção em nível de povoamento ou de distribuição diamétrica (CAMPOS; LEITE, 2025). Embora computacionalmente eficientes, esses modelos são inerentemente estáticos e agregados. Eles falham ao tentar capturar a natureza espacial da competição e a dinâmica transiente das mortalidades, muitas vezes subestimando a resiliência do talhão por tratarem o volume da mortalidade como uma perda uniforme e sem padrão espacial (TOMÉ; BURKHART, 1989; PORTÉ; BARTELINK, 2002; BURKHART; TOMÉ, 2012; CAMPOS; LEITE, 2025). Para transpor essa limitação, a biometria moderna recorre aos Modelos de Árvore Individual Espacialmente Explícitos (MAIEE) (PORTÉ; BARTELINK, 2002). Tais modelos operam com alto grau de resolução biológica, rastreando coordenadas cartesianas e vizinhanças para simular explicitamente as interações competitivas entre indivíduos e a partição de recursos no espaço (PORTÉ; BARTELINK, 2002).

Entretanto, observa-se na literatura uma lacuna de integração. De um lado, faltam evidências empíricas que isolem o efeito da fertilidade natural do sítio, para quantificar como a hierarquia de dominância modula o aproveitamento do espaço de crescimento liberado pela mortalidade. De outro, os modelos espaciais (MAIEEs) permanecem restritos a ambientes computacionais especializados, sem interfaces operacionais acessíveis que permitam aos gestores florestais simular cenários de risco de forma interativa e em tempo real (KANGAS; KANGAS; KURTTILA, 2015).

É exatamente na intersecção entre a necessidade de entendimento empírico e a urgência por ferramentas operacionais interativas que esta dissertação se insere. O presente trabalho propõe uma abordagem unificada, particionada em dois capítulos interdependentes. O Capítulo 1 atua como a base analítica e investigativa: por meio

de ferramentas estatísticas, ele identifica, quantifica e modela empiricamente os padrões reais de competição, mortalidade e crescimento compensatório na matriz florestal. O Capítulo 2 representa a extensão aplicada do Capítulo 1: os parâmetros e relações empíricas identificados fundamentam a arquitetura algorítmica de um simulador web espacialmente explícito, traduzindo as relações ecológicas quantificadas em uma ferramenta preditiva estocástica.

OBJETIVO GERAL

Compreender a dinâmica espaço-temporal da competição e do crescimento compensatório em plantios de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*, e transpor esse conhecimento biométrico para o desenvolvimento e validação de um simulador *web* espacialmente explícito aplicável ao manejo de riscos e resiliência florestal.

Objetivos específicos

- Avaliar empiricamente como a ocorrência de mortalidade adjacente altera as trajetórias alométricas das árvores remanescentes, isolando a capacidade produtiva do macroambiente e quantificando o efeito da hierarquia social e da transitoriedade do espaço liberado sobre o crescimento compensatório.
- Desenvolver um simulador florestal interativo, modelando a mortalidade como um processo estocástico dependente da distância, e validar a capacidade do sistema em reproduzir a resiliência produtiva do povoamento sob múltiplos cenários de intensidade e idade de mortalidade.

CAPÍTULO 1. DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO CRESCIMENTO COMPENSATÓRIO EM PLANTIOS CLONAIIS DE *EUCALYPTUS* E *CORYMBIA*.

RESUMO

Em povoamentos equiâneos, a mortalidade gera zonas de liberação competitiva. Este estudo objetivou quantificar a dinâmica espaço-temporal do crescimento compensatório em plantios de *Eucalyptus* e *Corymbia* sob diferentes capacidades produtivas. Utilizou-se uma base de dados de inventário contínuo, aplicando-se análise exploratória por meio de histogramas de frequência relativa, ajuste de trajetórias médias pelo modelo de Schumacher e regressão espacial (LOESS) para o diâmetro a 1,3m do solo, a altura total e o volume, além da formulação de um Fator de Liberação Espaço-Temporal (FLET). Modelos Lineares de Efeitos Mistos (LMM) foram ajustados, visando controlar a heterogeneidade espacial e isolar o efeito da fertilidade natural da parcela, contrastando árvores do grupo tratamento, submetidas à presença de vizinhos mortos ou falhas, com árvores do grupo controle, com vizinhança intacta na mesma idade e classe de sítio. Os resultados demonstraram que o crescimento compensatório prioriza o incremento secundário em diâmetro, mantendo o crescimento em altura pouco alterado. A magnitude da resiliência demonstrou-se dependente do sítio: ambientes de alta produtividade registraram ganhos volumétricos de +9,9% aos 6 anos, contra apenas +2,0% em sítios de baixa produtividade, os quais exibiram mortalidade crônica. Comprovou-se uma interação entre a hierarquia social e a liberação espacial: árvores dominantes capitalizam a área disponibilizada, enquanto indivíduos dominados sofrem supressão adicional. Conclui-se que o FLET integrado aos LMMs modela eficientemente a dinâmica espacial das falhas estruturais no povoamento. A capacidade de expansão lateral compensatória é uma resposta restrita aos indivíduos dominantes, evidenciando que sistemas de prognose devem incorporar o status fitossociológico e a distribuição espacial da mortalidade para evitar subestimativas na produção florestal.

Palavras-chave: Fator de Liberação Espaço-Temporal; Alívio competitivo; Modelagem de efeitos mistos.

1. INTRODUÇÃO

Os plantios florestais comerciais de rápido crescimento, especialmente aqueles formados por espécies e híbridos dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, desempenham papel fundamental no suprimento global de biomassa e fibra celulósica (FAO, 2022). Para assegurar a maximização da produtividade nestes povoamentos monoclonais, a silvicultura intensiva apoia-se na definição de arranjos espaciais e densidades de plantio que otimizem a interceptação de radiação solar e a absorção de água e nutrientes (GONÇALVES *et al.*, 2013). O espaçamento inicial atua como o principal regulador da arquitetura do dossel, determinando a trajetória de crescimento dimensional das árvores, a idade de fechamento das copas e o limiar para o início das interações competitivas entre os indivíduos (FORRESTER, 2019; RESENDE, 2019; SCHWERZ *et al.*, 2020).

Com o avanço cronológico do povoamento e a consequente sobreposição de copas e sistemas radiculares, a demanda por recursos ambientais excede a capacidade de suporte do sítio, deflagrando a competição interplantas (OLIVER; LARSON, 1996). Em povoamentos clonais, mesmo sob homogeneidade genética, pequenas variações microambientais e diferenças no vigor inicial das mudas promovem a diferenciação estrutural da floresta (SOARES, 2017). A competição assimétrica (WEINER, 1990) estabelece uma hierarquia de dominância na qual as árvores maiores capturam recursos de forma desproporcional ao seu tamanho relativo. Os indivíduos dos estratos inferiores tornam-se dominados, culminando na mortalidade dependente de densidade, o processo intrínseco de autodesbaste que reconfigura continuamente a distribuição espacial e a estrutura biométrica da floresta (PRETZSCH, 2009).

A ocorrência da mortalidade em escala intraparcela desencadeia um efeito microambiental imediato, caracterizado pela formação de zonas de alívio da competição local. A morte de um indivíduo resulta na disponibilização espacial de radiação solar, água e nutrientes que antes eram interceptados ou absorvidos por ele, tornando-os acessíveis para os indivíduos adjacentes. Em teoria, espera-se que as árvores remanescentes adjacentes ao espaço liberado reajam a essa súbita disponibilidade de recursos exibindo um crescimento compensatório. Contudo, a literatura científica carece de investigações detalhadas sobre a real magnitude desse fenômeno e sobre os padrões de resposta dimensional pelos quais ele se manifesta

em povoamentos monoclonais. Não há um consenso, por exemplo, sobre como o ganho de espaço afeta as diferentes dimensões da árvore, e se o crescimento secundário (diâmetro) e o crescimento primário (altura) respondem na mesma proporção a este evento. (FORRESTER, 2014, FORRESTER, 2019; DEL RÍO et al., 2019).

Contudo, não é trivial saber como fatores inerentes ao indivíduo e ao ambiente modulam essa resposta compensatória. Sabe-se que a capacidade produtiva do sítio determina a quantidade global de recursos disponíveis (SKOVSGAARD; VANCLAY, 2008), mas permanece a lacuna sobre como a hierarquia de tamanho inicial afeta a capacidade de resposta produtiva da árvore remanescente (RESENDE, 2019), especialmente no que tange à capacidade de indivíduos nos estratos inferiores (dominados) capitalizarem o espaço de crescimento liberado em comparação àquelas árvores que já ocupam o dossel superior (dominantes). Essa escassez de conhecimento estrutural e funcional pode limitar a precisão dos modelos de crescimento usuais (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Do ponto de vista biométrico, a investigação do crescimento compensatório esbarra em limitações metodológicas. Métricas tradicionais de densidade populacional, como o número de fustes por hectare ou a área basal, são inerentemente estáticas e tratam a mortalidade de forma agregada no nível do povoamento (CAMPOS; LEITE, 2025). Tais abordagens falham em capturar a natureza espacial da competição e a sua dinâmica transiente (TOMÉ; BURKHART, 1989). Biologicamente, o alívio competitivo não constitui um benefício permanente; trata-se de um pulso microambiental que maximiza a disponibilidade de espaço e recursos logo após a morte da árvore vizinha, decaindo à medida que as copas e raízes remanescentes reocupam o microsítio. A avaliação dessa complexidade requer o desenvolvimento de índices espaciais dinâmicos dependentes da distância e a aplicação de técnicas estatísticas como os modelos lineares de efeitos mistos (ZUUR et al., 2009; MEHTÄTALO; LAPPI, 2020). Esta modelagem permite separar o efeito de sítio, inerente à parcela, do incremento atribuível ao alívio competitivo local.

Diante da escassez de literatura sobre a magnitude e os fatores determinantes do crescimento compensatório em plantios clonais, o presente estudo teve como objetivo principal evidenciar e quantificar a dinâmica espaço-temporal desse tipo de crescimento, em povoamentos de *Eucalyptus* e *Corymbia* estabelecidos em sítios de diferentes capacidades produtivas. Os objetivos específicos foram: (i) avaliar como a

ocorrência de mortalidade adjacente altera as trajetórias de crescimento e os incrementos dimensionais (diâmetro, altura e volume) das árvores remanescentes individuais; (ii) quantificar como a distância à falha estrutural localizada e o tempo decorrido desde sua formação modulam a intensidade do alívio competitivo, mediante a formulação e aplicação de um Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*); e (iii) determinar, por meio de modelagem preditiva de efeitos mistos, como o vigor dimensional pré-existente e a posição fitossociológica da árvore modulam a sua capacidade de capitalização dos recursos liberados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e base de dados florestais

O presente estudo utilizou uma base de dados operacionais proveniente de plantios florestais comerciais dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, localizados nos municípios de Carbonita, Itamarandiba, Minas Novas e Montes Claros, no Estado de Minas Gerais. As características topográficas e climáticas detalhadas de cada município que compõe a área de estudo estão apresentadas na Tabela 1 (ALVARES *et al.*, 2013; IBGE, 2023; CLIMATE-DATA.ORG, 2024).

Tabela 1 - Características de altitude, clima, temperatura e precipitação dos municípios avaliados.

Município	Altitude média (m)	Clima (Köppen)	Temp. média anual (°C)	Precipitação média anual (mm)
Carbonita	741	Aw / Cwa	21,9	855
Itamarandiba	898	Cwa	20,5	921
Minas Novas	524	Aw	22,9	807
Montes Claros	646	Aw	23,1	869

Fonte: Adaptado de IBGE (2023), Alvares *et al.* (2013) e Climate-Data.org (2024).

Os povoamentos avaliados englobam uma diversidade de materiais genéticos, incluindo plantios de *Eucalyptus cloeziana*, *Corymbia citriodora*, áreas de mistura e diversos clones comerciais (e.g., SD144, GG100, I953, entre outros). Para acomodar diferentes objetivos de manejo e condições edáficas e climáticas, os plantios foram

estabelecidos sob um amplo gradiente de espaçamentos iniciais, abrangendo desde espaçamentos mais adensados, como 3,00 m x 1,20 m, até espaçamentos mais amplos, alcançando dimensões de 6,00 m x 3,00 m. Essa amplitude de condições, abrangendo diferentes espaçamentos, sítios e materiais genéticos, confere às inferências biométricas obtidas maior representatividade e capacidade de generalização para múltiplas variedades de plantio.

A base de dados origina-se de uma rede histórica de parcelas permanentes de Inventário Florestal Contínuo (IFC), cujas medições ocorreram entre os anos de 2008 e 2025. Em sua versão original, anterior aos procedimentos de controle de qualidade e filtragem, o banco de dados reuniu informações de 229.623 árvores individuais. Esse contingente arbóreo distribui-se em 2.554 parcelas de formato retangular, com área útil variável entre 300 m² e 1.200 m², alocadas em 576 talhões, os quais representam uma área efetiva de plantio de aproximadamente 17 mil hectares.

Em cada parcela, as equipes de mensuração registraram sistematicamente o diâmetro a 1,30 m de altura (*dap*) de todos os indivíduos vivos. Para a modelagem hipsométrica, mensurou-se a altura total (h_t) de uma subamostra composta por 10 árvores de fuste normal por parcela, além da altura de 3 a 5 árvores dominantes por medição, sendo a altura dos demais indivíduos estimados por meio de equações hipsométricas ajustadas. O volume (v_{tcc}) de cada árvore foi estimado com equações volumétricas já disponíveis para os povoamentos contemplados no estudo. Além das variáveis dimensionais quantitativas, o levantamento de campo englobou uma avaliação qualitativa. Códigos específicos foram atribuídos para descrever a condição silvicultural, a posição sociológica e o estado morfológico de cada árvore, categorizando-as quanto ao estrato no dossel (e.g., dominantes) e quanto à sanidade e arquitetura do fuste (e.g., normais, bifurcadas e quebradas), além de registrar as falhas e os indivíduos mortos. Para garantir o controle estrutural do povoamento, o inventário registrou a informação espacial de cada posição de plantio, identificando a respectiva linha (fila) e a sua posição sequencial na linha.

Para adequação à estrutura temporal da base de dados e ao rastreamento do histórico de sobrevivência, estabeleceu-se uma distinção cronológica: o status de falha foi contabilizado exclusivamente na primeira medição, refletindo o déficit de sobrevivência inicial de implantação, enquanto o status de árvore morta foi computado nas medições subsequentes, representando a mortalidade natural e a exclusão competitiva ao longo do crescimento do povoamento. Ressalta-se, contudo, que para

os propósitos analíticos deste trabalho, os termos falham e mortalidade são empregados como sinônimos operacionais, uma vez que ambos representam o mesmo efeito de supressão da planta e liberação de espaço na vizinhança. Esse histórico, aliado à localização relativa bidimensional de cada árvore, constituiu a base metodológica para o mapeamento espacial e, conseqüentemente, para a modelagem estatística do crescimento compensatório desencadeado pela liberação de recursos intraespecíficos.

2.2. Tratamento de dados e estratificação

2.2.1. Consolidação da base de dados

Para garantir a confiabilidade das análises, a base de dados foi submetida a um processo de consistência em nível de árvore individual. Foram excluídos os registros que apresentaram erros de mensuração, tais como incrementos dendrométricos negativos entre medições sucessivas e transições de sobrevivência ou de condição silvicultural biologicamente implausíveis. Foram descartadas também as árvores com alterações espaciais injustificadas (linha e cova) no croqui do inventário, ao longo do monitoramento.

Como etapa subsequente, estabeleceu-se um recorte temporal para as análises, restringindo a base de dados às observações ao intervalo de 2 a 8 anos de idade. Essa delimitação cronológica teve como propósito isolar o intervalo correspondente ao ciclo produtivo comercial típico.

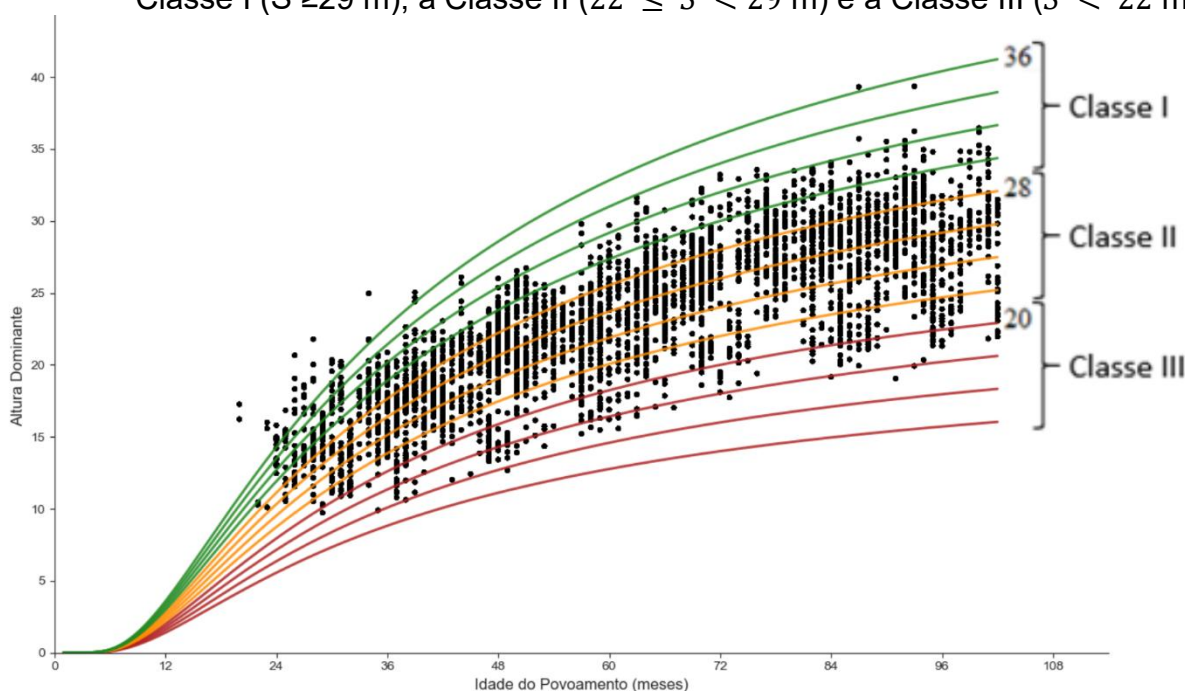
2.2.2. Classificação da capacidade produtiva

Inicialmente, para isolar o efeito macroambiental, no estudo sobre o crescimento compensatório, foram estimados o índice de sítio de cada parcela (S), pelo método da curva-guia com uma idade-índice de 72 meses. O modelo exponencial modificado, na forma logarítmica, foi ajustado preferencialmente para cada talhão, nos demais casos, em que o volume de observações era insuficiente para garantir a convergência estatística nessa escala local, a modelagem foi redirecionada para um nível hierárquico mais abrangente de estratificação (e.g., agrupamento por projeto ou região), assegurando a robustez dos parâmetros. A relação funcional ajustada foi $\ln h_d$

$= \beta_0 + \beta_1 I^{-1} + \varepsilon$, em que h_d é a altura dominante (m), I é a idade (meses), β_0 e β_1 são os parâmetros e $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$. Os índices de sítio foram obtidos por $S = e^{(\ln h_d - \beta_1(I - 1 - 72 \cdot 1))}$.

Cada parcela foi categorizada considerando três classes discretas: *I* ($S \geq 29$ m), *II* ($22 \leq S < 29$ m) e *III* ($S < 22$ m). Esta estratificação garantiu o agrupamento das unidades amostrais em ambientes de suporte estritamente equivalentes, anulando o fator de confusão edafoclimático nas modelagens posteriores. O feixe de curvas-guia gerado pelas projeções anamórficas, sobreposto aos dados do inventário (Figura 1), comprova a aderência das estimativas e a adequada estratificação da base de dados nas três faixas de capacidade produtiva delineadas para o estudo.

Figura 1 - Relação da altura dominante em função da idade do povoamento e definição das faixas de índice de local para a base de dados avaliada, destacando a Classe I ($S \geq 29$ m), a Classe II ($22 \leq S < 29$ m) e a Classe III ($S < 22$ m).



Com a base de dados devidamente consolidada, a Tabela 2 apresenta a análise descritiva das variáveis dendrométricas mensuradas em nível de árvore individual. A estratificação dos dados por classe de idade e classe de sítio evidencia a amplitude dimensional do povoamento, explicitando o ganho incremental em diâmetro e volume ao longo do ciclo de rotação, bem como o efeito do gradiente de produtividade sobre o padrão de crescimento individual.

Tabela 2 - Análise descritiva das variáveis dendrométricas em nível de árvore individual da base de dados de inventário florestal contínuo, estratificada por classe de idade e classe de sítio.

Idade	Sítio	<i>dap</i>			<i>h_t</i>			<i>v_{tcc}</i>		
		min	max	média	min	max	média	min	max	média
2	I	4,5	14,9	11,3	4,0	21,9	15,6	0,0033	0,1531	0,0731
	II	4,8	15,5	10,8	7,2	22,5	13,8	0,0077	0,1812	0,0602
	III	5,0	12,0	8,8	6,9	12,7	10,0	0,0059	0,0588	0,0284
3	I	4,5	17,5	12,8	6,8	26,1	18,5	0,0053	0,2901	0,1101
	II	4,0	17,7	11,8	7,3	23,5	15,9	0,0055	0,2083	0,0808
	III	4,1	16,4	10,1	6,4	17,2	11,7	0,0053	0,1546	0,0432
4	I	5,0	20,5	14,4	9,9	27,5	22,5	0,0106	0,4001	0,1733
	II	4,5	22,2	13,4	4,9	26,3	19,7	0,0068	0,3163	0,1278
	III	4,1	23,6	11,3	7,4	19,7	13,8	0,0045	0,2062	0,0637
5	I	4,5	24,0	15,6	10,2	33,1	26,7	0,0080	0,6778	0,2474
	II	4,5	27,8	14,4	8,4	32,8	22,3	0,0073	0,6423	0,1672
	III	4,3	21,6	12,6	7,8	22,9	16,4	0,0030	0,2582	0,0896
6	I	4,4	23,5	16,2	11,1	37,7	28,7	0,0100	0,6331	0,2874
	II	4,0	27,5	15,1	7,8	35,4	24,6	0,0039	0,6770	0,2045
	III	4,5	25,1	13,6	8,8	27,5	18,5	0,0042	0,3967	0,1174
7	I	4,2	28,5	16,7	8,4	44,0	30,0	0,0052	0,7619	0,3278
	II	4,3	37,4	15,7	8,0	41,7	26,3	0,0073	0,6274	0,2395
	III	4,1	29,3	14,3	7,3	32,5	20,2	0,0032	0,3919	0,1376
8	I	6,0	25,0	17,1	12,0	44,0	31,2	0,0176	0,7301	0,3545
	II	4,4	44,4	16,3	9,1	52,5	27,4	0,0055	0,8198	0,2697
	III	4,7	33,4	15,1	8,4	33,2	21,2	0,0037	0,5549	0,1629

2.2.3. Mapeamento espacial

Com a base dendrométrica consolidada e estratificada, estruturou-se a consistência estrutural do povoamento. A vizinhança de cada indivíduo foi mapeada considerando um raio de influência imediata composto pelos oito vizinhos adjacentes a cada árvore central, configurando uma matriz de vizinhança de 3x3 posições de plantio. Para mitigar o viés do efeito de borda e assegurar a representação fiel do status de competição, as duas primeiras linhas e as duas primeiras posições de cada

extremidade da parcela (borda 2x2) foram desconsideradas como árvores-foco. Ademais, exigiu-se estritamente que todas as árvores mantidas no conjunto de dados de projeção possuísem a configuração de vizinhança completa (3x3). Indivíduos cujos micro-sítios apresentavam mapeamento incompleto de vizinhos foram excluídos.

2.2.4. Mortalidade regular

Para assegurar que a modelagem capturasse exclusivamente a mortalidade por competição intraespecífica, principal componente da mortalidade regular em plantios clonais de eucalipto, foram descartadas as parcelas que apresentavam taxas de mortalidade superiores a 20%. Povoamentos com mortalidade excessiva foram removidos da análise por refletirem, potencialmente, eventos atípicos ou catastróficos, tais como déficits hídricos, ataques de pragas, doenças, problemas na qualidade da muda ou falhas massivas de plantio, os quais poderiam descaracterizar a dinâmica natural de liberação de espaço de crescimento. Adicionalmente, estabeleceu-se um critério restritivo de pareamento intraparcela: foram mantidas na base de dados exclusivamente as unidades amostrais que continham, de maneira simultânea, indivíduos sobreviventes ao final da rotação, com vizinhos mortos ou falha e indivíduos com vizinhança adjacente intacta.

2.3. Definição do status de competição e análise espacial

A definição do *status* de competição intraespecífica baseou-se no mapeamento espacial da vizinhança imediata de cada árvore-foco. Foi considerado como "vizinho morto" qualquer posição de plantio adjacente (avaliada na matriz de 3x3 árvores) cujo *status* qualitativo de campo indicasse falha de implantação ou mortalidade ao longo do ciclo. A partir desse mapeamento, os indivíduos sobreviventes foram categorizados em dois grupos silviculturais distintos para a modelagem: o grupo controle, composto por árvores inseridas em vizinhança completa e intacta, e o grupo tratamento, formado por árvores associadas a pelo menos um vizinho morto.

2.3.1. Superfície de probabilidade de falhas: abordagem não paramétrica

Para quantificar a magnitude e a extensão do alívio de competição em escala intraparcela, as posições espaciais relativas (linha e posição sequencial) foram convertidas em coordenadas métricas em um plano cartesiano (X e Y). Sobre essa malha espacial, aplicou-se a técnica de regressão não paramétrica ponderada localmente (LOESS) (CLEVELAND, 1979), que estima uma superfície suavizada por meio de regressões polinomiais locais ajustadas em subconjuntos vizinhos de observações. Nesse procedimento, o valor da superfície para uma coordenada específica é calculado por meio de mínimos quadrados ponderados, utilizando-se a função de peso tricúbica, de modo que os pesos atribuídos às observações (posições de plantio) sejam máximos no local estimado e decresçam gradativamente até zero no limite da vizinhança estabelecida.

Para a parametrização do algoritmo, o coeficiente de suavização espacial (*span*) foi fixado em 0,3, estabelecendo que a probabilidade de falha em cada micro-sítio fosse estimada com base nos 30% dos dados espaciais mais próximos. Adicionalmente, adotou-se o ajuste polinomial de primeiro grau, uma abordagem linear local escolhida para garantir a estabilidade da superfície contínua e mitigar o risco de superajuste (*overfitting*).

A suavização espacial promovida pelo modelo LOESS transcreveu a natureza pontual e discreta das mortes individuais (*status* vital binário) para uma superfície contínua de probabilidade e intensidade de mortalidade. Como resultado, esse procedimento identificou com precisão as zonas de mortalidade e os micro-sítios de liberação de recursos, estimando um gradiente contínuo de alívio competitivo que independe do formato geométrico exato da zona de mortalidade.

2.3.2. Integração espaço-temporal da mortalidade

Com o objetivo de integrar a magnitude espacial das zonas de mortalidade à dinâmica de crescimento do povoamento, foi idealizado e definido o Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*). Em contraste com as métricas tradicionais e estáticas de densidade populacional, o *FLET* foi concebido para quantificar o alívio competitivo real e cumulativo, incorporando simultaneamente à distância física das árvores mortas ou ausentes e o tempo decorrido desde as referidas ocorrências. O

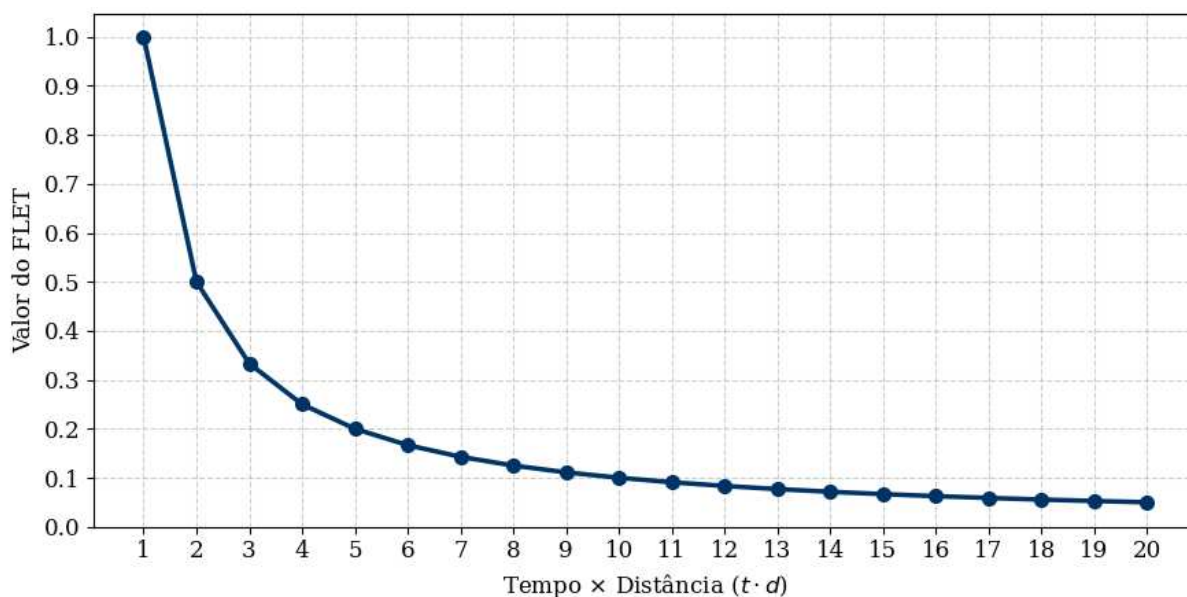
índice, para uma dada árvore remanescente, foi estruturado pela expressão (Equação 1):

$$FLET_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{t_j \cdot d_{ij}} \right) \quad (\text{Eq. 1}),$$

em que $FLET_i$ é o fator de liberação espaço-temporal calculado para a árvore-foco i . O operador de somatório ($\sum$) denota o caráter aditivo da métrica, iterando sobre todos os n vizinhos mortos identificados na área de influência, onde j representa cada falha individual. No denominador da fração, d_{ij} corresponde à distância euclidiana geométrica (em metros) entre a árvore-foco i e o respectivo vizinho morto j ; e t_j representa o tempo cronológico decorrido desde a ocorrência da mortalidade daquele vizinho específico (em anos).

Operacionalmente, a variável t_j atua como um contador do tempo de exposição à zona de alívio competitivo gerada pelo vizinho j : no momento (ano) em que a mortalidade é inicialmente detectada, atribui-se $t_j = 1$; a cada ano subsequente de avaliação em que a falha se mantém, esse valor é acrescido de uma unidade ($t_j = 2$, $t_j = 3$, e assim sucessivamente). Esta formulação fundamenta-se na premissa de que o alívio competitivo e o consequente ganho em disponibilidade de recursos comportam-se de forma inversamente proporcional à distância da falha e decaem com o passar do tempo. A presença de múltiplas falhas eleva o valor do somatório, capturando com precisão o benefício de uma liberação multidirecional. Logo após a ocorrência de uma mortalidade ($t_j = 1$), o pulso de liberação associado àquela mortalidade específica atinge sua magnitude máxima. À medida que o tempo avança (t_j aumenta), a fração correspondente retrocede gradativamente, simulando a reocupação progressiva do espaço disponível e o restabelecimento da dinâmica competitiva pelos indivíduos remanescentes (Figura 2).

Figura 2 - Decaimento do Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*)



2.4. Dinâmica espaço-temporal da mortalidade

Para compreender a distribuição cronológica dos eventos de mortalidade e a consequente evolução do alívio competitivo ao longo da rotação, procedeu-se a uma análise quantitativa da dinâmica de mortalidade do povoamento. O monitoramento dessa dinâmica foi estruturado em duas métricas de dinâmica populacional: a incidência e a prevalência. A incidência de mortalidade foi calculada como a taxa percentual de novas perdas populacionais registradas a cada medição sucessiva. Essa especificação metodológica permitiu identificar com precisão os períodos críticos de ocorrência de mortes na matriz florestal. Por sua vez, a prevalência de liberação competitiva foi mensurada pela proporção cumulativa de árvores sobreviventes que passaram a ter pelo menos um vizinho direto morto em sua zona de influência imediata.

Para avaliar o comportamento dessas métricas sob diferentes regimes produtivos, a evolução temporal dos dados foi examinada por meio de análises gráficas, com as observações estratificadas por classes de capacidade produtiva (S). O objetivo dessa estratificação foi investigar como a capacidade produtiva do sítio influencia a cronologia da mortalidade, além de mapear visualmente o percentual da população que efetivamente vivencia alterações em seu status de competição ao longo do crescimento.

2.5. Análise exploratória do crescimento compensatório

Uma análise exploratória foi conduzida para inspecionar visualmente o comportamento das variáveis dendrométricas sob diferentes intensidades de competição. Para avaliar a estrutura dimensional do povoamento, procedeu-se à construção de histogramas de frequência relativa para o diâmetro a 1,30 m de altura (dap), a altura total (h_t) e o volume total com casca (v_{tcc}). Para a estruturação das distribuições, adotaram-se intervalos de classe definidos em 2 cm para o dap , 2 m para a h_t e 0,05 m³ para o v_{tcc} . Esse procedimento metodológico permitiu contrastar as árvores do grupo tratamento (com vizinho morto ou falha) diretamente contra as árvores do grupo controle (com vizinhança intacta) inseridas, de forma simultânea, em uma mesma idade e em uma mesma classe de sítio.

Adicionalmente, para permitir a avaliação do desempenho de crescimento individual isolando-se os efeitos de macroambiente, aplicou-se um procedimento estatístico de relativização intraparcela. Nesse passo metodológico, o valor absoluto de cada variável de interesse (dap , h_t e v_{tcc}) mensurado na árvore-foco foi dividido pela respectiva média aritmética da unidade amostral à qual o indivíduo pertencia. A conversão das dimensões absolutas em variáveis relativas consistiu em uma estratégia analítica para anular o viés de confusão gerado pela fertilidade natural do solo e pelo potencial produtivo dos diferentes materiais genéticos utilizados nos plantios. Sob essa métrica, valores relativos superiores à unidade ($> 1,0$) indicam que a árvore apresenta uma performance dendrométrica acima da média de sua própria parcela. Para investigar a resposta das árvores ao alívio competitivo, essas variáveis relativas de performance foram cruzadas, por meio de gráficos de dispersão, com o índice de mortalidade local gerado pela regressão não paramétrica LOESS. Nessa análise, a métrica do LOESS atuou como um gradiente contínuo no eixo das abscissas, variando de 0 (indicando vizinhança intacta e ausência de alívio competitivo) até valores próximos a 1 (denotando zonas de máxima incidência de mortalidade adjacente). Esse procedimento teve como finalidade identificar os padrões de tendência e correlação entre a intensidade do alívio competitivo e o incremento compensatório local.

2.6. Modelagem de crescimento

A modelagem de crescimento foi estruturada em duas frentes analíticas complementares, partindo da avaliação descritiva do comportamento médio até a comprovação estatística temporal do crescimento compensatório.

2.6.1. Modelagem base de trajetória média

Com o intuito de caracterizar as trajetórias médias de crescimento em valores absoluto e avaliar os limites biológicos de crescimento do povoamento, ajustou-se o modelo clássico de Schumacher (Equação 2) para as variáveis dendrométricas de interesse (dap , h_t e v_{tcc}), em função da idade. A estrutura matemática foi parametrizada em sua forma linearizada:

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot I^{-1} + \varepsilon, \quad y = dap, h_t \text{ e } v_{tcc}, \quad (\text{Eq. 2})$$

Os ajustes foram realizados a partir de uma dupla estratificação: por classe de capacidade produtiva (*I*, *II* e *III*) e por *status* de competição (indivíduos sob alívio competitivo *versus* vizinhança intacta). O propósito analítico dessa etapa foi investigar se a ocorrência de falhas altera a trajetória média, o limite máximo assintótico (β_0) e o incremento periódico (β_1) da árvore ao longo da rotação, avaliando esse comportamento em diferentes capacidades produtivas

2.6.2. Modelagem preditiva de efeitos mistos

A segunda frente analítica consistiu na comprovação estatística da existência e da magnitude do crescimento compensatório por meio de Modelos Lineares de Efeitos Mistos (LMM). A opção por essa classe de modelos fundamentou-se na natureza hierárquica dos dados, em que as árvores estão agrupadas dentro de parcelas. Essa estrutura viola a premissa de independência das observações exigida pela regressão linear clássica (Mínimos Quadrados Ordinários), uma vez que indivíduos de uma mesma parcela compartilham condições comuns de microclima, solo e material genético, podendo apresentar maior correlação entre si do que com indivíduos de outras unidades (ZUUR *et al.*, 2009).

A formulação matemática do modelo seguiu a notação matricial descrita por Zuur *et al.* (2009): $y = X\beta + Zb + \varepsilon$ (Eq.3), em que: y é o vetor da variável resposta (dap ou h_t aos 6 anos de idade, marco que coincide com a meia-rotação/fim do ciclo e permite avaliar a consolidação do ganho produtivo); X é a matriz de delineamento dos efeitos fixos; β é o vetor de parâmetros de efeitos fixos; Z é a matriz de delineamento dos efeitos aleatórios; b é o vetor de parâmetros de efeitos aleatórios (parcelas), assumindo $b \sim (0, \psi)$ e ε é o vetor de erros residuais, onde $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I)$.

O componente de efeitos fixos foi estruturado para isolar o efeito do ganho de espaço, utilizando como preditores: a dimensão inicial da árvore aos 3 anos (dap_3 ou h_{t3}), a variação do Fator de Liberação Espaço-Temporal ($\Delta FLET$) e o termo de interação entre ambos ($Dimensão_{Inicial} \times \Delta FLET$). A inclusão da dimensão inicial como covariável permitiu o ajuste de modelos de covariância (ANCOVA) sob o enfoque de efeitos mistos, garantindo que a comparação do efeito de $\Delta FLET$ ocorresse entre indivíduos de mesmo vigor inicial.

Para capturar a variabilidade latente do macroambiente e corrigir o viés de pseudoreplicação, a "parcela" foi inserida como efeito aleatório (intercepto aleatório). Essa abordagem permitiu que cada unidade amostral possuísse seu próprio intercepto, absorvendo as flutuações de produtividade local e permitindo que os coeficientes associados ao $\Delta FLET$ refletissem o efeito "puro" da liberação competitiva.

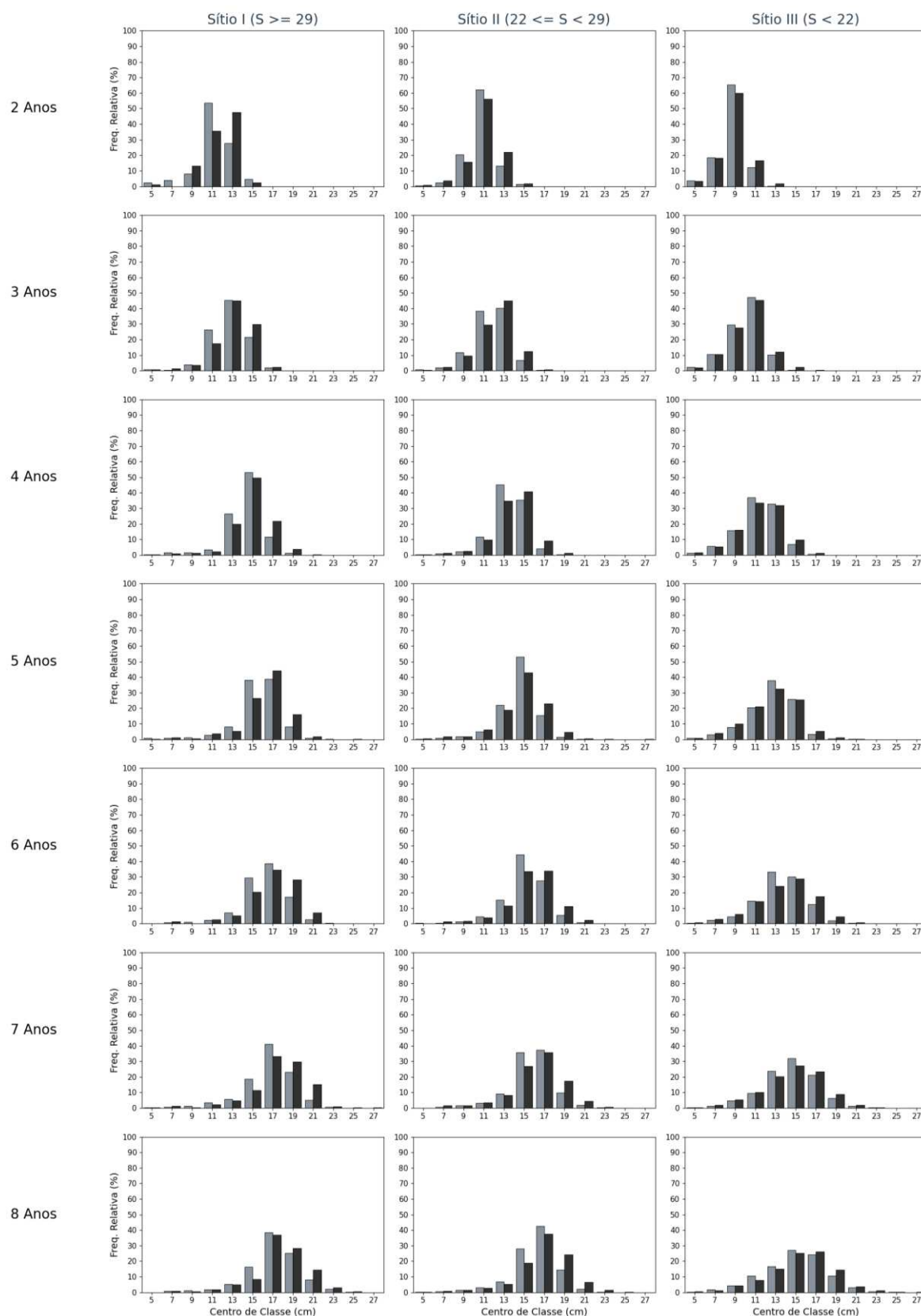
A estimação dos parâmetros foi realizada pelo método da Máxima Verossimilhança Restrita (REML), preferível ao método da Máxima Verossimilhança (ML) por fornecer estimativas não viesadas dos componentes de variância, especialmente em delineamentos com múltiplos níveis (ZUUR *et al.*, 2009). A qualidade dos ajustes foi verificada por meio da análise de resíduos (homocedasticidade e normalidade). A qualidade final de ajuste dos modelos foi avaliada com base nas seguintes estatísticas: raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE); coeficiente de correlação de Pearson, entre os valores estimados e observados (r) e eficiência do modelo (EF). As análises estatísticas foram executadas utilizando o pacote *nlme* (PINHEIRO; BATES, 2026) no ambiente R v4.4.1 (R CORE TEAM, 2024).

3. RESULTADOS

3.1. Dinâmica estrutural do povoamento

A Figura 3 apresenta a evolução da distribuição de classes de *dap* (diâmetro a 1,3m do solo) do povoamento, expressa em frequência relativa, estratificada por idade (2 a 8 anos), qualidade do local (Classes *I*, *II* e *III*) e condição da vizinhança (intacta *versus* com vizinho morto ou falha).

Figura 3 - Distribuição de frequência relativa por classes de *dap* (cm) ao longo do tempo (2 a 8 anos), estratificada por capacidade produtiva do local (Sítios I, II e III) e *status* da vizinhança: intacta (cinza) e com falha ou mortalidade adjacente (preto).



De modo geral, observa-se que o avanço da idade promove o deslocamento contínuo das curvas de distribuição para as classes de maior diâmetro, independentemente da qualidade do sítio e do *status* de vizinhança. Aos dois anos de idade, a distribuição concentra-se em um intervalo estreito e apresenta assimetria à direita, nos sítios *I* e *II*, com os picos de frequência localizados predominantemente nas classes diamétricas de 9 a 13 cm. Com o passar do tempo, as distribuições tornam-se mais achatadas e com maior dispersão em sua amplitude geométrica. Aos 8 anos, a base da distribuição expande-se, englobando desde as classes de 9 cm até centros de classe de 25 cm ou 27 cm, refletindo-se em um achatamento da curva e consequente redução na frequência relativa máxima das modas.

A capacidade produtiva do local altera a magnitude e a taxa de deslocamento dessas distribuições (Figura 3). No sítio *I*, a transição dos indivíduos para as maiores classes diamétricas ocorre de maneira mais expressiva e acelerada ao longo dos anos. Aos 8 anos é observada uma proporção consolidada de árvores nas classes de 21 a 25 cm, com a moda posicionada na classe de 17 cm. Em contrapartida, no sítio *III*, o deslocamento da curva à direita é mais conservador. Nesta qualidade de local, aos 8 anos, a amplitude máxima alcançada é menor, e o pico de concentração dos indivíduos retém-se em diâmetros inferiores, predominantemente nas classes de 13 a 17 cm. O sítio *II* exibe comportamento e amplitudes intermediárias em relação aos extremos de produtividade.

A avaliação do *status* da vizinhança evidencia padrões de diferenciação estrutural na distribuição de frequências (Figura 3). Nas idades iniciais (2 e 3 anos), as distribuições das árvores com vizinhança intacta e daquelas associadas a falhas ou vizinhos mortos apresentam sobreposição, com divergências mínimas em suas proporções.

Entretanto, a partir do quarto ano, estabelece-se um padrão de distanciamento sistemático entre as duas condições. As árvores localizadas adjacentes a falhas ou vizinhos mortos passam a exibir maiores frequências relativas nas classes diamétricas superiores de cada respectiva distribuição, enquanto os indivíduos inseridos em uma vizinhança intacta retêm as maiores proporções relativas nas classes diamétricas inferiores ou centrais. Esse padrão de segregação diamétrica acentua-se nas idades mais avançadas (6 a 8 anos), contudo, a magnitude dessa diferenciação é dependente da capacidade produtiva do local. O distanciamento entre as curvas de frequência das

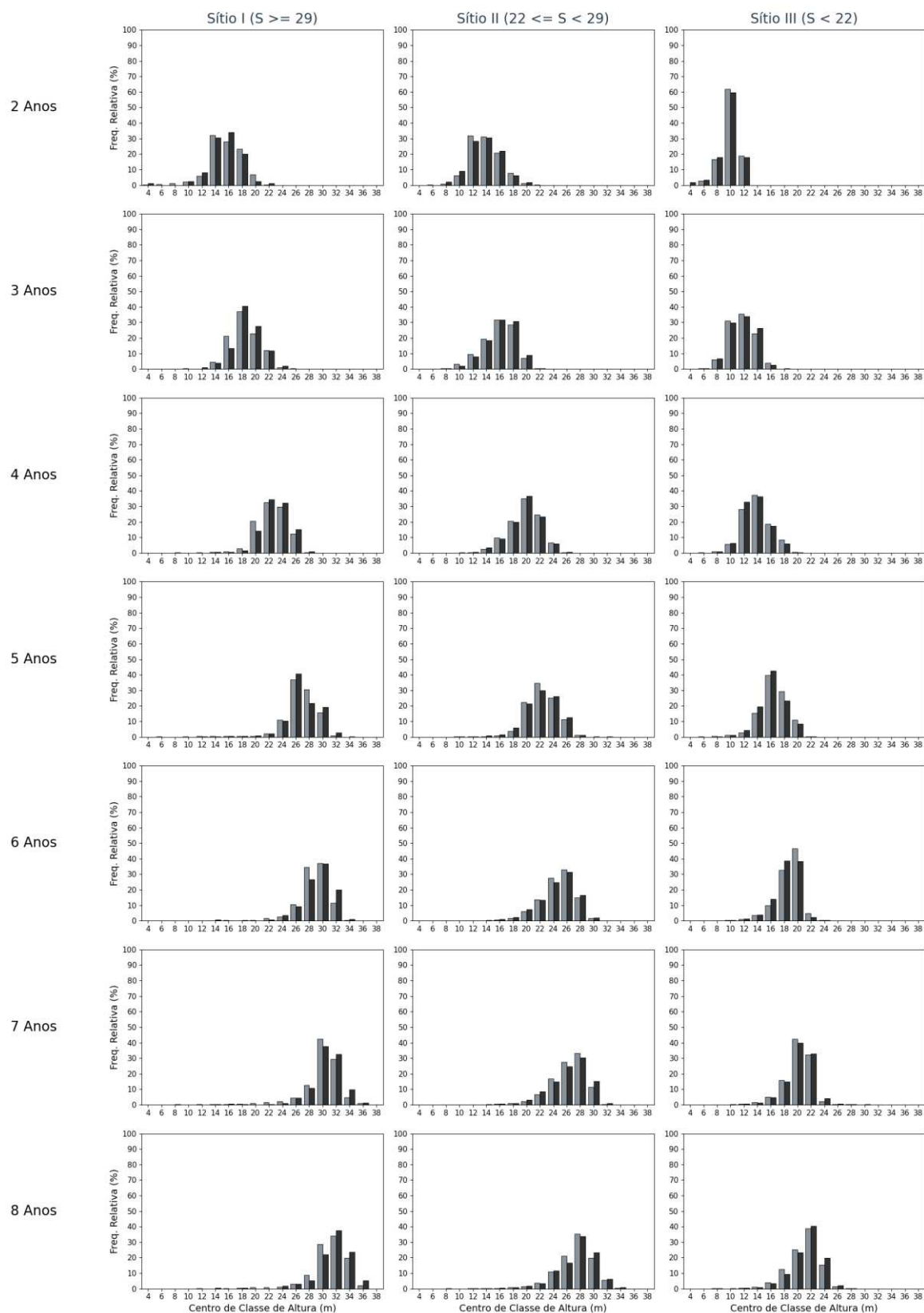
duas condições de vizinhança revela-se expressivamente maior nos Sítios I e II. No sítio III embora a tendência geométrica de deslocamento à direita se mantenha para árvores com falhas adjacentes, a segregação estrutural entre as curvas ocorre de forma atenuada em comparação aos ambientes de maior produtividade.

A Figura 4 ilustra a dinâmica temporal da distribuição hipsométrica (frequência relativa por classes de altura), categorizada pelos mesmos estratos de idade, capacidade produtiva e *status* de vizinhança. O avanço cronológico do povoamento reflete-se no deslocamento progressivo das distribuições para as classes de maior altura. A distribuição hipsométrica exibiu uma menor amplitude de dispersão ao longo do tempo, mantendo uma concentração de indivíduos em um número restrito de classes centrais (picos de frequência mais elevados), desde as idades iniciais até o oitavo ano.

A estratificação por classes de sítio evidenciou impactos diretos na magnitude do deslocamento das distribuições ao longo do eixo das abscissas (Figura 4). No sítio I, a transição para as classes superiores de altura ocorre de forma expressiva e acelerada; aos 8 anos, a distribuição consolida-se com a moda posicionada nas classes de 32 a 34 m. No II, observou-se um crescimento intermediário, com a maior concentração de indivíduos situando-se entre 28 e 30 m de altura na mesma idade. Por outro lado, no sítio III, a progressão hipsométrica é conservadora. Aos 2 anos, a distribuição encontra-se altamente concentrada na classe de 10 m e, ao final do período avaliado (8 anos), o pico de frequência restringe-se às classes de 20 a 22 m, evidenciando uma evolução estrutural vertical inferior à dos demais ambientes.

A avaliação do *status* da vizinhança na distribuição de alturas revela um comportamento distinto daquele previamente documentado para os diâmetros. A Figura 4 demonstra uma constante sobreposição entre as distribuições das árvores com vizinhança intacta e daquelas adjacentes a falhas ou vizinhos mortos. Ao longo de toda a série temporal (2 a 8 anos) e em todas as qualidades de sítio, não se estabelece um padrão de distanciamento sistemático ou segregação entre as duas condições. As distribuições mantêm-se simétricas e coincidentes em suas classes modais e amplitudes, indicando que a ocorrência de falhas na vizinhança não promove deslocamentos expressivos na estrutura hipsométrica dos indivíduos remanescentes.

Figura 4 - Distribuição de frequência relativa por classes de altura total (m) ao longo do tempo (2 a 8 anos), estratificada por capacidade produtiva do local (Sítios I, II e III) e *status* da vizinhança: intacta (cinza) e com falha ou mortalidade adjacente (preto).



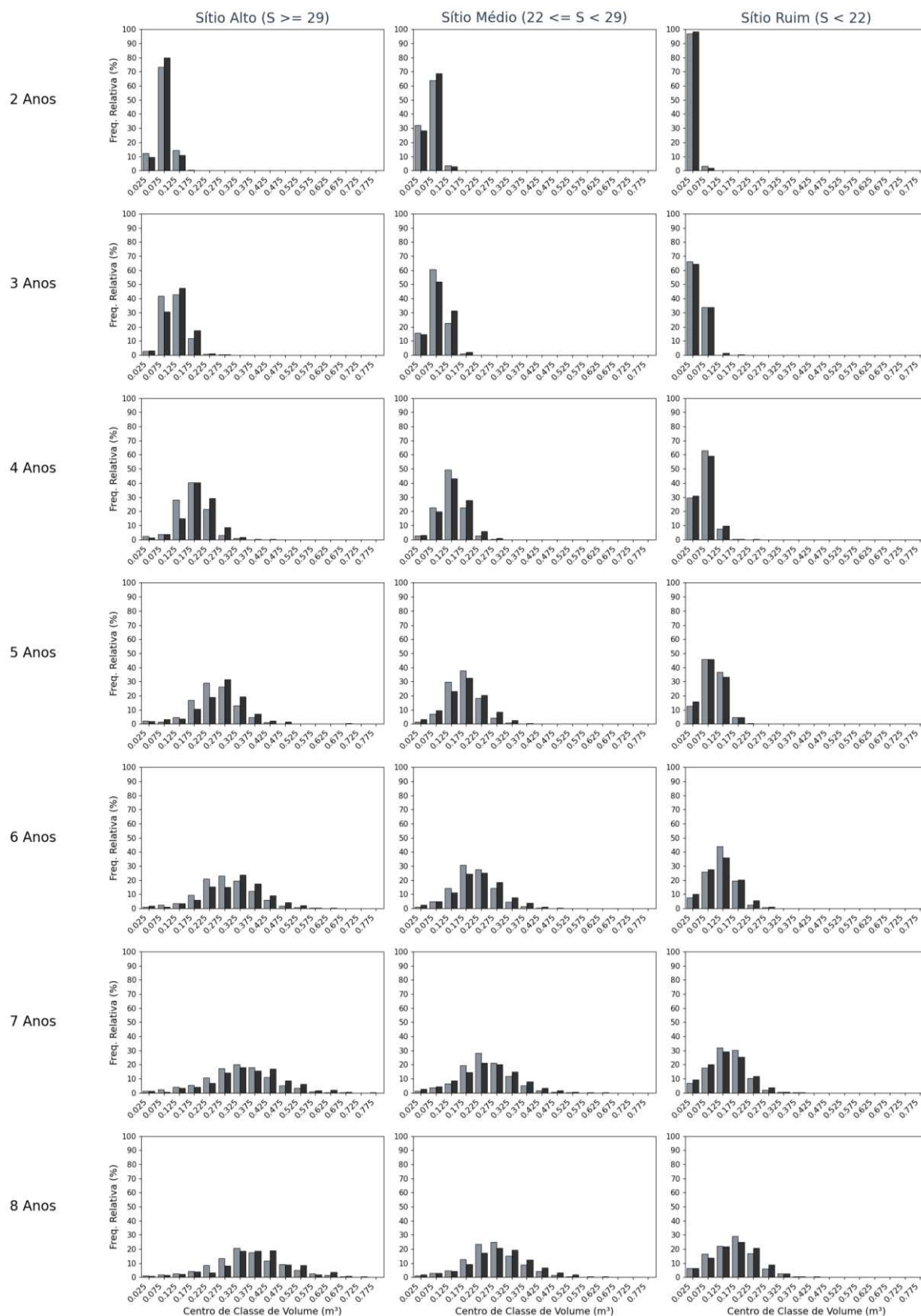
A Figura 5 exibe a evolução temporal da distribuição volumétrica (frequência relativa por centros de classe de volume, em m^3), estratificada por idade, qualidade de sítio e condição de vizinhança. Com o avanço cronológico do povoamento, observa-se um contínuo deslocamento das distribuições para as classes de maior volume. Destaca-se que a distribuição volumétrica apresenta um expressivo aumento de dispersão (achatamento da curva) ao longo do tempo. Aos 2 anos, os indivíduos concentram-se nas primeiras classes de volume (0,025 a 0,125 m^3), configurando distribuições com assimetria à direita. Aos 8 anos, a amplitude expande-se consideravelmente, distribuindo as árvores por múltiplas classes dimensionais e reduzindo os picos de frequência máxima.

A capacidade produtiva do local determina a magnitude do crescimento volumétrico e a amplitude da distribuição nas idades avançadas (Figura 5). No sítio I, o deslocamento da curva à direita é notável; aos 8 anos, a base da distribuição é substancialmente ampla, alcançando centros de classe de até 0,675 m^3 , com proporções relativas mais diluídas ao longo do eixo horizontal. Em contraste, o sítio III exibe uma progressão volumétrica restrita. Nesta qualidade de local, ao oitavo ano, a distribuição mantém-se concentrada em classes inferiores, com o pico principal retido na classe de 0,175 m^3 e amplitude máxima que não ultrapassa as classes de 0,375 m^3 . O sítio II reflete um comportamento transicional.

Nas medições iniciais (2 e 3 anos), as curvas das árvores inseridas em vizinhança intacta e daquelas com falhas adjacentes sobrepõem-se quase integralmente. A partir do quarto ano, consolida-se uma segregação progressiva: indivíduos adjacentes a falhas ou vizinhos mortos passam a apresentar maiores frequências relativas nas caudas superiores da distribuição volumétrica de seu respectivo estrato. Simultaneamente, árvores em vizinhança intacta acumulam maiores proporções nas classes inferiores e modais.

Essa diferenciação geométrica na estrutura de volumes é condicionada pela qualidade do local. Nos sítios I e II, o distanciamento das distribuições volumétricas entre as duas condições de vizinhança torna-se nítido e expressivo entre o sexto e o oitavo ano. No sítio (III), por outro lado, a magnitude dessa segregação é atenuada, de modo que as distribuições de volume das árvores com e sem falhas na vizinhança mantêm um elevado grau de sobreposição até a idade final de avaliação.

Figura 5 - Distribuição de frequência relativa por classes de volume total com casca (m^3) ao longo do tempo (2 a 8 anos), estratificada por capacidade produtiva do local (Sítios *I*, *II* e *III*) e *status* da vizinhança: intacta (cinza) e com falha ou mortalidade adjacente (preto).



3.2. Trajetórias médias de crescimento

A Figura 6 ilustra as trajetórias médias de crescimento (modelo de Schumacher) para as variáveis diâmetro (dap), altura total (h_t) e volume total com casca (v_{tcc}) em função da idade, segregadas por classe de sítio e condição de vizinhança. Os parâmetros ajustados e as métricas de qualidade de ajuste estão detalhados na Tabela 3. O modelo log-linearizado resultou em ajustes significativos (p -valor $< 0,001$) para todos os coeficientes interceptos (β_0) e de inclinação (β_1) em todos os estratos avaliados.

Figura 6 - Projeção de crescimento em Diâmetro (dap), Altura Total (h_t) e Volume Total (v_{tcc}) baseada no modelo de Schumacher, estratificada por capacidade produtiva (Sítios I, II e III). As trajetórias evidenciam os ganhos relativos aos 6 anos de idade ao contrastar árvores inseridas em vizinhança intacta (linha tracejada cinza) contra indivíduos com falha ou mortalidade adjacente (linha contínua preta).

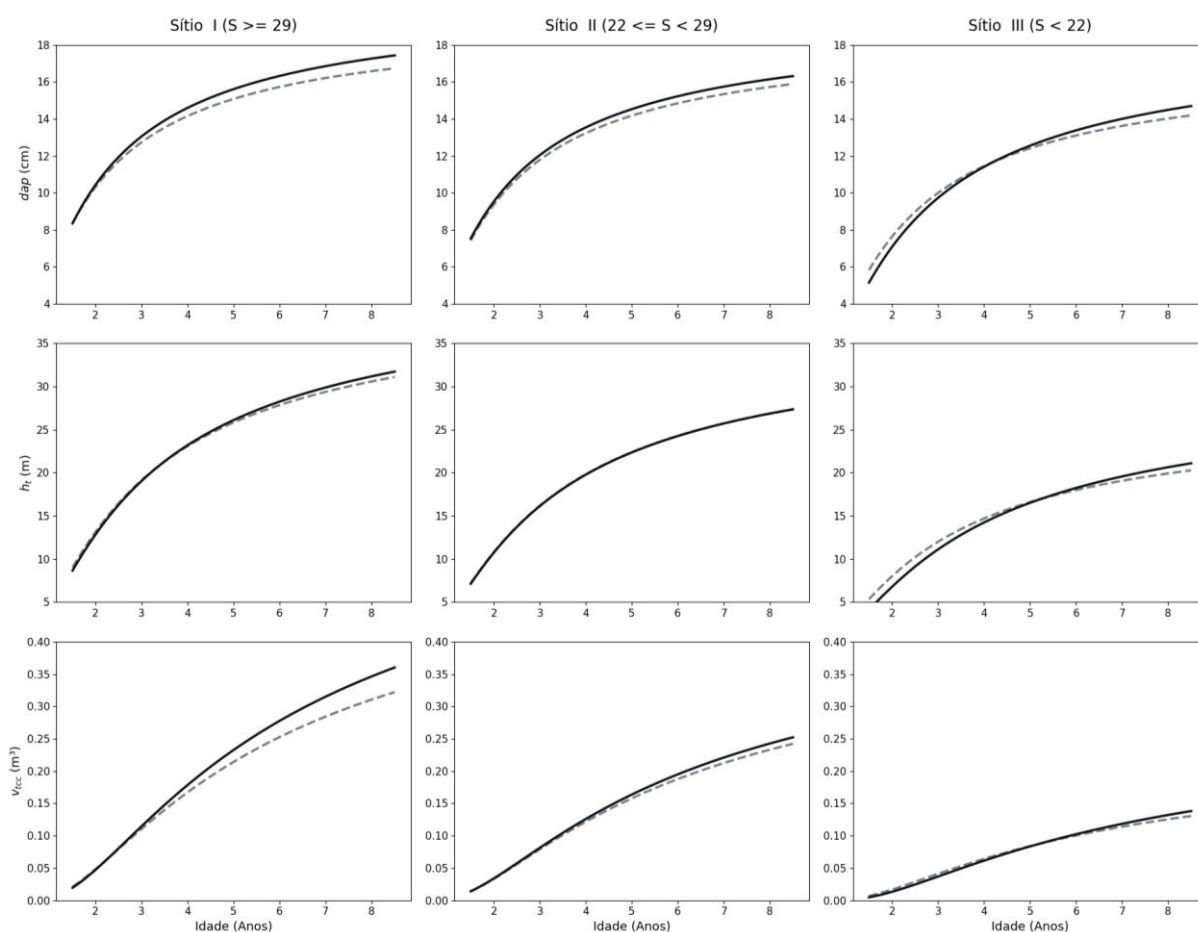


Tabela 3 - Parâmetros estatísticos e métricas de ajuste do modelo de Schumacher para as variáveis dap , h_t e v_{tcc} , estratificados por classe de sítio e condição de vizinhança.

Variável	Sítio	Condição	β_0	p-valor β_0	β_1	p-valor β_1	R ²	RMSE	Assíntota
dap	I (S >= 29)	Vizinhança Intacta	2,9664	< 0.001	-1,266	< 0.001	0,3747	2,212	19,422
		Vizinho Morto	3,0163	< 0.001	-1,3426	< 0.001	0,3548	2,337	20,415
	II (22 <= S < 29)	Vizinhança Intacta	2,9285	< 0.001	-1,3858	< 0.001	0,4228	1,938	18,700
		Vizinho Morto	2,9577	< 0.001	-1,409	< 0.001	0,3138	2,387	19,253
	III (S < 22)	Vizinhança Intacta	2,8436	< 0.001	-1,6253	< 0.001	0,3293	2,414	17,177
		Vizinho Morto	2,9126	< 0.001	-1,9146	< 0.001	0,2374	2,803	18,404
h_t	I (S >= 29)	Vizinhança Intacta	3,7018	< 0.001	-2,2527	< 0.001	0,7781	2,665	40,521
		Vizinho Morto	3,7351	< 0.001	-2,3662	< 0.001	0,7712	2,667	41,892
	II (22 <= S < 29)	Vizinhança Intacta	3,5944	< 0.001	-2,4339	< 0.001	0,766	2,414	36,395
		Vizinho Morto	3,5967	< 0.001	-2,4497	< 0.001	0,7004	2,691	36,479
	III (S < 22)	Vizinhança Intacta	3,2957	< 0.001	-2,4366	< 0.001	0,6911	2,224	26,998
		Vizinho Morto	3,3988	< 0.001	-2,9759	< 0.001	0,6802	2,177	29,928
v_{tcc}	I (S >= 29)	Vizinhança Intacta	-0,5502	< 0.001	-4,9552	< 0.001	0,5212	0,084	0,577
		Vizinho Morto	-0,3971	< 0.001	-5,3072	< 0.001	0,5237	0,091	0,672
	II (22 <= S < 29)	Vizinhança Intacta	-0,8071	< 0.001	-5,1967	< 0.001	0,54	0,06	0,446
		Vizinho Morto	-0,7607	< 0.001	-5,247	< 0.001	0,4318	0,076	0,467
	III (S < 22)	Vizinhança Intacta	-1,4054	< 0.001	-5,3617	< 0.001	0,398	0,046	0,245
		Vizinho Morto	-1,2596	< 0.001	-6,1198	< 0.001	0,2855	0,057	0,284

A análise paramétrica (Tabela 3) revelou que a presença de falhas na vizinhança induz uma alteração na trajetória de crescimento das árvores remanescentes, manifestando-se no parâmetro da assíntota (Valor Assintótico Teórico). Para a variável dap , o modelo ajustado para a condição com vizinho morto ou falha projetou limites assintóticos superiores em todas as classes de produtividade. No sítio I, a assíntota estimada foi de 20,4 cm para árvores com alívio competitivo, contra 19,4 cm para a vizinhança intacta. No sítio II, os valores assintóticos foram de 19,2 cm e 18,7 cm, respectivamente; e no sítio III, 18,4 cm frente a 17,2 cm.

Estas alterações paramétricas refletem-se em um descolamento positivo da curva de crescimento em diâmetro para as árvores beneficiadas pelo alívio competitivo a partir das idades iniciais (Figura 3). Ao sexto ano, o modelo estima um incremento absoluto superior para a condição de falha na magnitude de +0,6 cm (+3,8%), +0,4 cm (+2,6%) e +0,3 cm (+2,1%) para os sítios I, II e III, respectivamente. Observa-se que, embora a inclinação das curvas sugira um ganho contínuo até a estabilização assintótica, a magnitude relativa desse ganho reduz-se com o declínio da qualidade do local.

Para a variável Altura Total (h_t), o comportamento diferiu do padrão verificado no diâmetro. A Tabela 3 indica que os limites assintóticos estimados apresentam diferenças numéricas menores entre as condições de vizinhança: 41,9 m (Vizinho Morto ou Falha) vs. 40,5 m (Vizinhança Intacta) no sítio I; e valores semelhantes no sítio II (36,5 m vs. 36,4 m). No sítio III, a assíntota foi de 29,9 m para árvores do grupo tratamento e 27,0 m para o grupo controle. Apesar dessas variações paramétricas na assíntota teórica global, as curvas de projeção na Figura 6 atestam uma sobreposição nas trajetórias hipsométricas ao longo do ciclo produtivo avaliado. Aos 6 anos, a diferença projetada em altura é pouco expressiva nos sítios I (+0,4 m; +1,4%) e III (+0,2 m; +1,3%), e matematicamente nula no sítio II (+0,0 m; +0,0%), corroborando os padrões descritivos previamente analisados.

A modelagem da variável Volume Total (v_{tcc}) evidenciou a resposta mais proeminente à presença de falhas na vizinhança, resultante da interação geométrica entre a resposta diamétrica e a estabilidade hipsométrica. A parametrização assintótica (Tabela 3) projeta limites superiores consistentes para as árvores adjacentes as falhas: 0,672 m³ (sítio I), 0,467 m³ (sítio II) e 0,284 m³ (sítio III), contra 0,577 m³, 0,446 m³ e 0,245 m³ das respectivas vizinhanças intactas.

O ganho projetado aos 6 anos apresenta uma estratificação dependente do sítio: no sítio *I*, estima-se um diferencial expressivo de $+0,025 \text{ m}^3$ (+9,9%) em favor da árvore com alívio competitivo; no *II*, a diferença é de $+0,007 \text{ m}^3$ (+3,9%); e no *III*, a resposta é atenuada, projetando-se um ganho de apenas $+0,002 \text{ m}^3$ (+2,0%). Esse comportamento atesta que a trajetória de acumulação volumétrica compensatória não é um padrão fixo, mas uma função escalar que atinge sua máxima amplitude em ambientes de elevada capacidade produtiva.

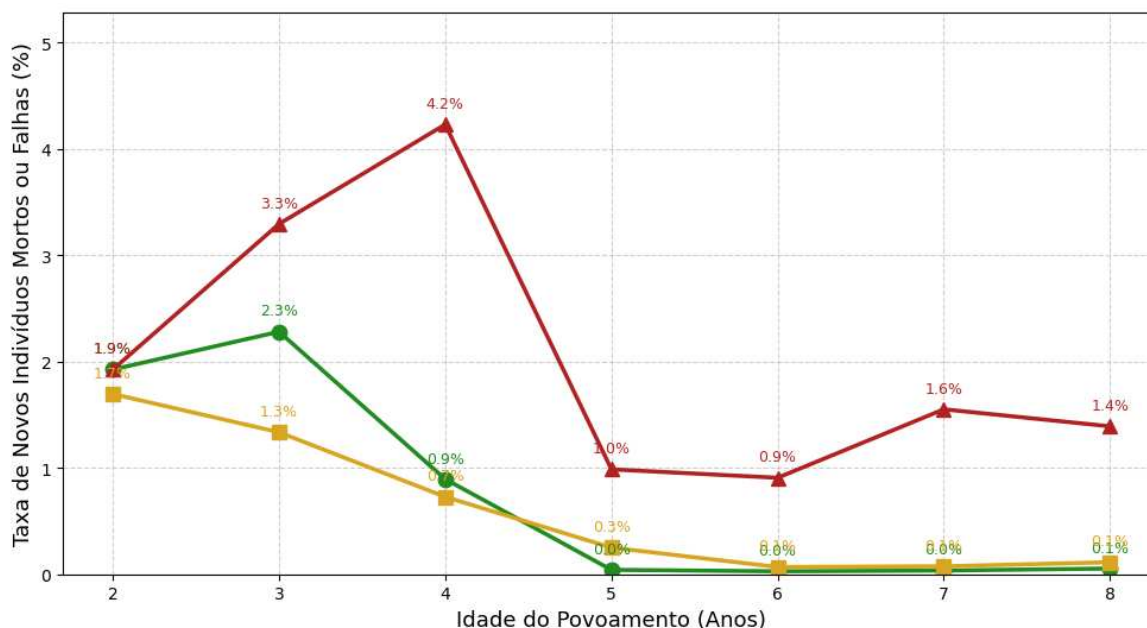
3.3. Dinâmica espaço-temporal da mortalidade e liberação competitiva

A evolução da incidência de mortalidade e da prevalência de árvores sob efeito de liberação competitiva, estratificadas por classe de sítio, é apresentada nas Figuras 7 e 8.

A taxa de incidência de novos indivíduos mortos ou falhos (Figura 7) exhibe um comportamento heterogêneo entre as qualidades de sítio ao longo do ciclo. No Sítio *III*, observa-se a maior instabilidade e os maiores picos de mortalidade, com uma taxa ascendente que atinge o valor máximo de 4,2% ao quarto ano. Após esse período, embora ocorra uma redução, a incidência permanece sistematicamente superior à dos demais sítios, apresentando novos incrementos de mortalidade entre o sexto e o oitavo ano (variando de 0,9% a 1,6%).

Em contraste, os sítios *I* e *II* demonstraram um padrão de estabilização precoce. No *I*, a incidência atinge seu ápice aos 3 anos (2,3%) e decresce drasticamente, tornando-se residual ($< 0,1\%$) a partir do quinto ano. O sítio *II* seguiu uma tendência similar, com taxas de mortalidade decrescentes a partir do segundo ano e estabilização em níveis próximos a zero a partir do sexto ano.

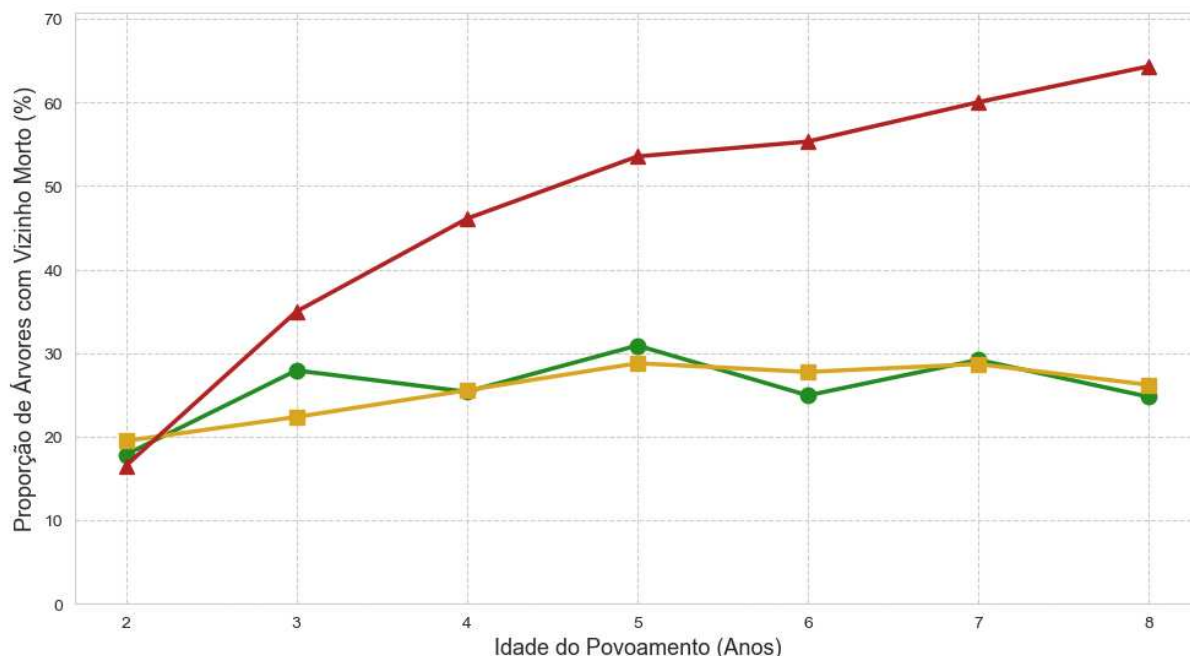
Figura 7 - Dinâmica temporal da taxa de incidência de falhas e mortalidade natural, estratificada por classes de capacidade produtiva: sítio I (verde), sítio II (amarelo) e sítio III (vermelho).



Essa dinâmica de novos eventos reflete-se diretamente na prevalência de árvores sob liberação competitiva (Figura 8). Observa-se um incremento cumulativo e contínuo na proporção de árvores que possuem vizinhos mortos, sendo essa progressão influenciada pela qualidade do local. No sítio III, a prevalência evolui de forma acelerada e linear até o sétimo ano, onde atinge o patamar de 59,5%, indicando que a maioria absoluta da população sobrevivente neste ambiente encontra-se adjacente a uma falha.

Nos ambientes de maior produtividade (I e II), a prevalência de alívio competitivo apresenta uma trajetória de crescimento mais moderada e estável. Ambas as classes de sítio iniciam o ciclo com cerca de 18% de árvores sob efeito de liberação e evoluem de maneira concomitante até o quinto ano, alcançando aproximadamente 30%. A partir dessa idade, a prevalência tende à estabilização, encerrando o oitavo ano com valores entre 24,8% e 25,8%. Esse padrão evidencia que, nos sítios I e II, o *status* de competição da população é definido majoritariamente nas idades iniciais, enquanto no III a estrutura de competição é continuamente alterada por eventos sucessivos de mortalidade ao longo de todo o período avaliado.

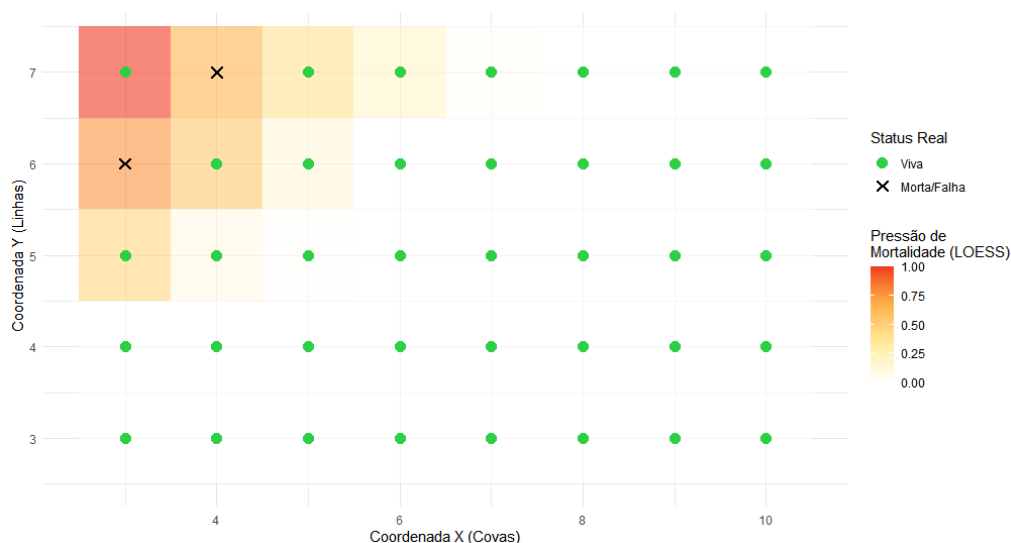
Figura 8 - Evolução temporal da prevalência cumulativa de árvores sobreviventes sob efeito de liberação competitiva (presença de falha adjacente), estratificada por capacidade produtiva: sítio I (verde), sítio II (amarelo) e sítio III (vermelho).



3.4. Mapeamento espacial da mortalidade e crescimento compensatório intraparcela

A Figura 9 ilustra, por meio de uma parcela, o mapeamento bidimensional da distribuição espacial da mortalidade associado à superfície de resposta contínua gerada pela regressão não paramétrica LOESS. Utilizando esta parcela como exemplo do padrão estrutural avaliado, nota-se que o modelo interpola os eventos discretos e binários de falha (indivíduos mortos), convertendo-os em um gradiente espacial de influência de mortalidade. Observa-se que a presença de falhas gera zonas locais de alto índice de liberação (representadas pelas áreas avermelhadas e alaranjadas, com valores LOESS próximos a 1,0). A partir destes epicentros de mortalidade, o modelo irradia uma superfície de intensidade decrescente que se dissipa em direção às áreas de vizinhança intacta (zonas claras, com LOESS tendendo a 0,0). Essa representação exemplifica a extensão física da liberação de recursos, demonstrando graficamente que o alívio competitivo configura um micro-sítio de influência que atinge as árvores circunvizinhas em diferentes magnitudes.

Figura 9 - Exemplo representativo do mapeamento espacial de uma unidade amostral, ilustrando a superfície de pressão de mortalidade estimada por regressão não paramétrica (LOESS) e o gradiente contínuo de liberação competitiva.



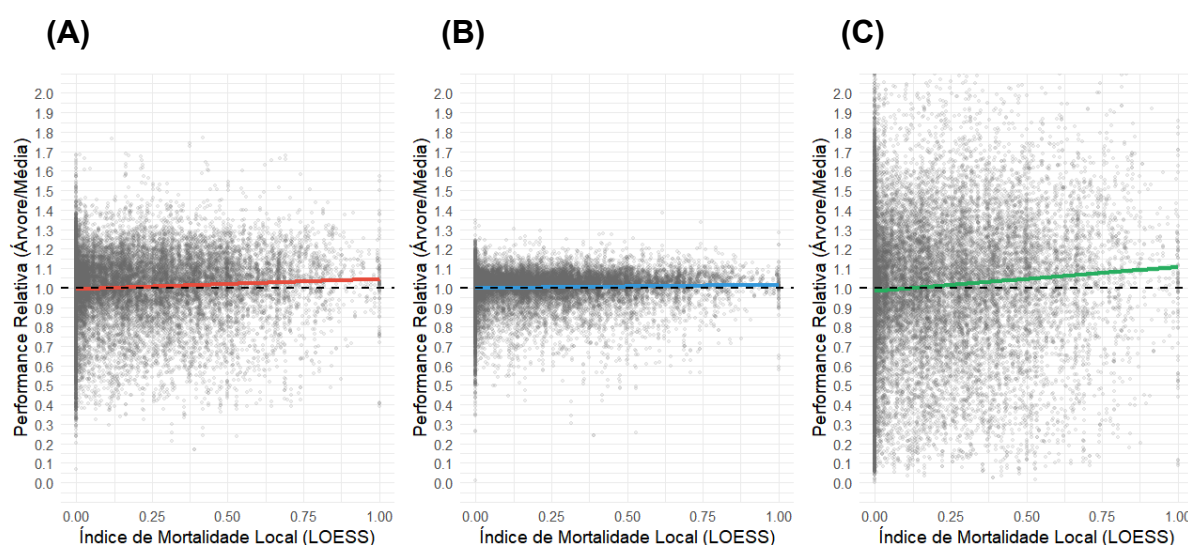
A Figura 10 apresenta os gráficos de dispersão que relacionam a performance dendrométrica relativa (variável observada dividida pela média da parcela) ao Índice de Mortalidade Local (LOESS) de cada indivíduo sobrevivente. O isolamento do fator macroambiental (via uso de variáveis relativas) evidencia comportamentos de resposta distintos entre os parâmetros de crescimento perante a magnitude do espaço liberado.

Para a variável altura total (h_t) relativa, a reta de tendência ajustada à nuvem de dispersão apresenta-se estritamente horizontal e coincidente com a marca unitária ($y = 1,0$) em toda a extensão do eixo das abscissas. Esse padrão indica a ausência de correlação direcional entre a intensidade do alívio competitivo e o ganho em altura. As árvores mantêm a performance hipsométrica em conformidade com a média de sua respectiva parcela, independentemente de estarem inseridas em áreas densas (LOESS = 0) ou em zonas de alta liberação (LOESS = 1).

Em contrapartida, as distribuições relativas de diâmetro (dap) e volume (v_{tcc}) relativos exibem uma trajetória ascendente em resposta ao índice de mortalidade adjacente (Figura 10). À medida que o gradiente de liberação competitiva aumenta, observa-se uma elevação progressiva na linha de tendência. A resposta é mais expressiva no volume relativo (linha verde), cuja reta de tendência revela a maior inclinação positiva dentre as três métricas. Esse comportamento demonstra que os indivíduos submetidos aos maiores índices de alívio local (LOESS > 0,75) tendem a

registrar performances volumétricas superiores à média aritmética de sua parcela de origem ($y > 1,0$). O dap relativo (linha vermelha) acompanha o mesmo padrão de ganho proporcional, consolidando a evidência descritiva de que a magnitude do crescimento em diâmetro compensatório intraparcela é positivamente correlacionada à intensidade da falha estrutural mapeada pelo modelo LOESS.

Figura 10 - Dispersão da performance dendrométrica relativa: dap (A), h_t (B) e v_{tcc} (C), de árvores sobreviventes em função do Índice de Mortalidade Local (LOESS), evidenciando as tendências de crescimento compensatório intraparcela.



3.5. Modelagem preditiva de efeitos mistos

A avaliação estatística do crescimento compensatório, isolando-se os efeitos latentes inerentes ao macroambiente (parcela), foi consolidada por meio do ajuste de Modelos Lineares de Efeitos Mistos. A modelagem baseou-se em um expressivo volume de dados, contemplando 7.710 observações distribuídas em 228 parcelas.

Antes da interpretação dos coeficientes, a adequação das premissas estatísticas dos modelos ajustados para a altura total e o diâmetro aos 6 anos (h_{t_6} e dap_6) foi confirmada por meio da análise gráfica dos resíduos e dos efeitos aleatórios (Figura 11 e 12). O gráfico de dispersão dos resíduos normalizados em função dos valores ajustados atestou a homocedasticidade dos modelos, apresentando distribuição aleatória e sem tendências em torno de zero. A premissa de normalidade foi validada pelos gráficos de probabilidade normal (Q-Q plots), que demonstraram o

alinhamento satisfatório tanto dos resíduos quanto dos melhores preditores lineares não viesados (BLUPs), extraídos para o intercepto e para a inclinação aleatória, ao longo da reta teórica.

Figura 11 - Painel de diagnóstico para validação das premissas estatísticas do Modelo Linear de Efeitos Mistos aplicado à Altura Total aos 6 anos (h_{t_6}): (A) homocedasticidade, (B) normalidade dos resíduos, e normalidade dos efeitos aleatórios (BLUPs) de (C) intercepto e (D) inclinação (h_{t_3}).

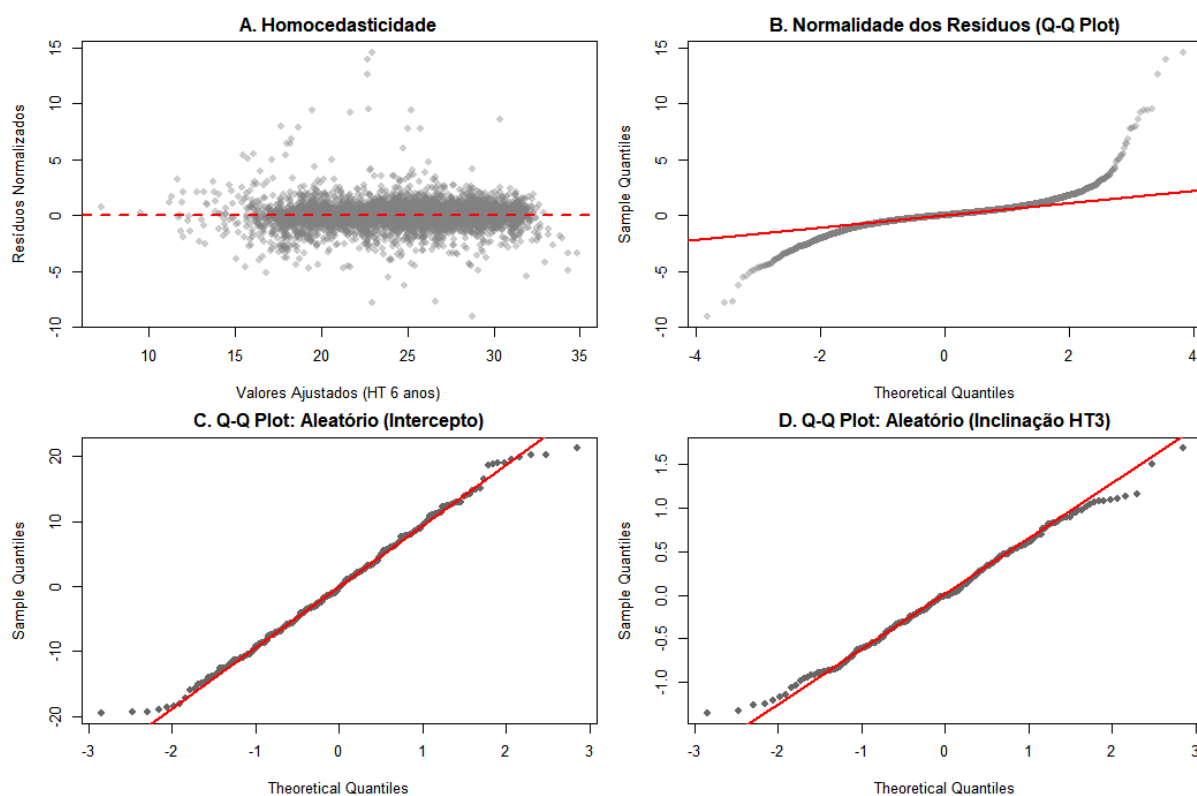
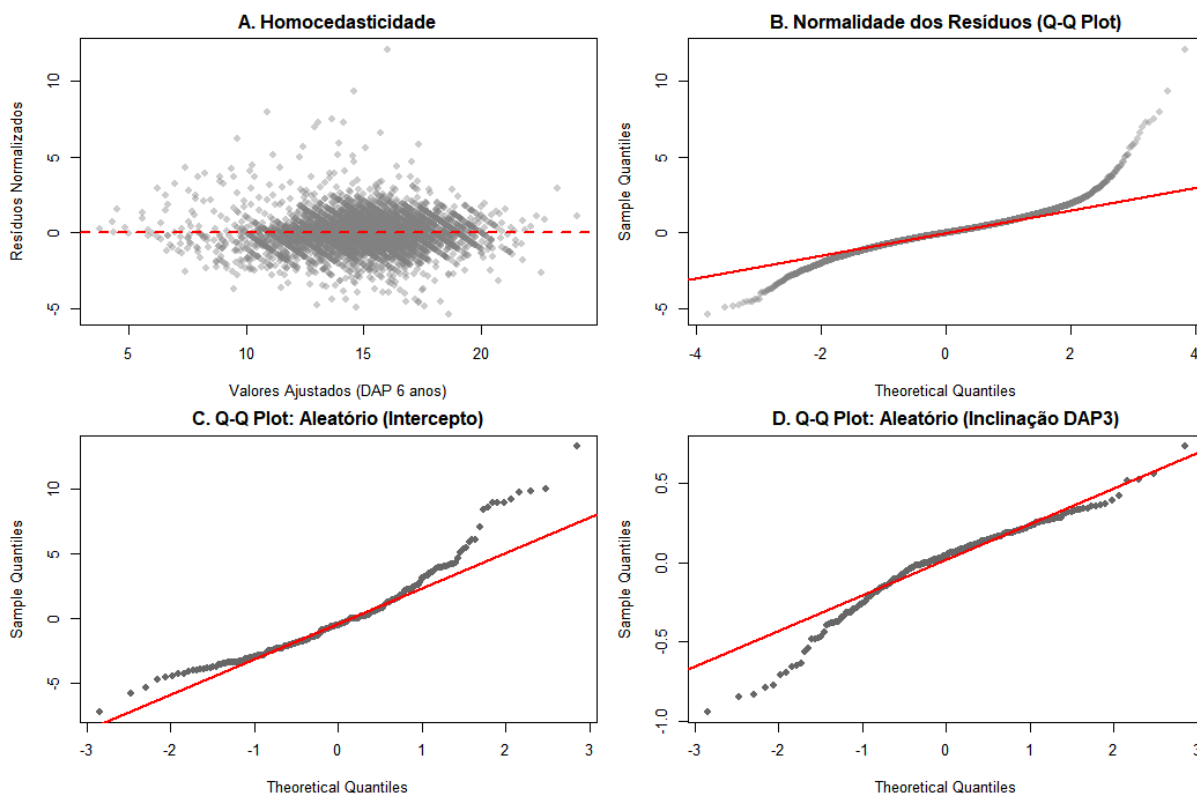


Figura 12 - Painele de diagnóstico para validação das premissas estatísticas do Modelo Linear de Efeitos Mistos aplicado ao Diâmetro aos 6 anos (dap_6): (A) homocedasticidade, (B) normalidade dos resíduos, e normalidade dos efeitos aleatórios (BLUPs) de (C) intercepto e (D) inclinação (dap_3).



A inserção da parcela como componente de efeito aleatório foi efetiva na correção da dependência espacial e da pseudoreplicação, resultando em métricas de ajuste robustas. O modelo para a Altura Total (h_{t_6}) apresentou coeficiente de correlação de Pearson (r) igual a 0,9756, Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) de 0,8289 m e uma Eficiência de Modelo (EF, análoga ao R^2) de 0,9519. De modo semelhante, o modelo projetado para o Diâmetro (dap_6) resultou em uma correlação (r) de 0,9145, RMSE de 0,9283 cm e uma EF de 0,8362.

Na formulação paramétrica avaliada, a variável preditora contínua $\Delta FLET$ quantifica a variação do alívio competitivo entre o terceiro e o sexto ano. Dada a arquitetura matemática do índice, na qual o pulso de liberação retrocede com o avanço cronológico devido à ocupação do espaço ocioso, esta variável assume valores negativos (ou nulos, em vizinhança intacta), representando o gradiente de preenchimento da área liberada.

Para a variável Altura Total (h_{t_6}), a análise paramétrica indica que todos os preditores da componente de efeitos fixos foram significativos ($p < 0,01$) (Tabela 4).

O modelo estimou um efeito principal positivo para a variação da liberação ($\Delta FLET$; $\beta_2 = 3,278$; $p = 0,0069$). Inserido no domínio numérico negativo do $\Delta FLET$, este coeficiente indica que a intensificação do decaimento do alívio competitivo exerce uma força matemática de supressão sobre a altura final projetada. Contudo, essa magnitude direcional é restrita e modulada pelo termo de interação entre a dimensão inicial e a variação espacial ($h_{t_3} \times \Delta FLET$), o qual apresentou estimativa negativa e significativa ($\beta_3 = -0,2279$; $p = 0,0041$).

Tabela 4 - Estimativas dos parâmetros (efeitos fixos e componentes de variância) do modelo linear de efeitos mistos para a projeção da Altura Total (h_{t_6}).

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Valor t	p-valor
Efeitos Fixos				
Intercepto (β_0)	4,216136	0,6930	6,08	$p < 0,001$
h_{t_3} (β_1)	1,326597	0,0450	29,47	$p < 0,001$
$\Delta FLET$ (β_2)	3,278524	1,2125	2,70	$p < 0,01$
$h_{t_3} \times \Delta FLET$ (β_3)	-0,227908	0,0794	-2,86	$p < 0,01$
Efeitos Aleatórios (Parcela)	Desvio Padrão	Correlação		
Intercepto	9,7744			
h_{t_3}	0,6369	-0,932		
Resíduo	0,8526			

Na modelagem da variável Diâmetro (dap_6), consolida-se uma dinâmica estrutural análoga, caracterizada, contudo, por uma magnitude de resposta estatística substancialmente superior (Tabela 5). O efeito principal da variação da liberação exibe alta inclinação positiva ($\Delta FLET$; $\beta_2 = 4,906$; $p < 0,001$). O coeficiente de interação associado ao tamanho inicial acompanha a tendência de significância, com valor negativo ($dap_3 \times \Delta FLET$; $\beta_3 = -0,462$; $p < 0,001$).

Tabela 5 - Estimativas dos parâmetros (efeitos fixos e componentes de variância) do modelo linear de efeitos mistos para a projeção do Diâmetro (dap_6).

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	Valor t	p-valor
Efeitos Fixos				
Intercepto (β_0)	1,318918	0,2723	4,84	$p < 0,001$
dap_3 (β_1)	1,181642	0,0227	51,90	$p < 0,001$
$\Delta FLET$ (β_2)	4,906782	1,3000	3,77	$p < 0,001$
$dap_3 \times \Delta FLET$ (β_3)	-0,462082	0,1122	-4,11	$p < 0,001$
Efeitos Aleatórios (Parcela)				
Intercepto	3,6428			
dap_3	0,3034	-0,94		
Resíduo	0,9533			

As interações paramétricas estimadas pelos modelos foram materializadas por meio de curvas de resposta (Figuras 13 e 14). Nestes gráficos, a dimensão dendrométrica final esperada (h_{t_6} e dap_6) é projetada no eixo das ordenadas ao longo de um gradiente contínuo de liberação competitiva ($\Delta FLET$) disposto no eixo das abscissas, onde o valor zero indica uma vizinhança intacta e valores negativos crescentes indicam a intensificação do alívio competitivo adjacente. Para evidenciar o efeito modulador da hierarquia social, as projeções foram estratificadas em três cenários de dimensão inicial (aos 3 anos), simulando o comportamento paramétrico de árvores dominadas, médias e dominantes.

A projeção para a Altura Total (Figura 13) revela que a resposta hipsométrica à mortalidade vizinha possui um comportamento polarizado e divergente. Para o estrato inferior, simulado em árvores dominadas ($h_{t_3} = 7$ m), a trajetória apresenta um declínio perante o gradiente espacial; ou seja, à medida que a intensidade da mortalidade vizinha aumenta (valores de $\Delta FLET$ mais negativos), a projeção de altura final sofre um impacto deletério e decresce. De forma notável, o estrato médio ($h_{t_3} = 15$ m) atua como um ponto de transição neutro: a sua projeção apresenta-se estabilizada ao longo de todo o eixo X, indicando que indivíduos de porte intermediário não são impactados pela variação do alívio competitivo. Para os indivíduos do dossel superior ($h_{t_3} = 23$ m), a inclinação inverte o seu comportamento preditivo. Para esta classe dominante, a intensificação do alívio competitivo estimula a manutenção e

discretos ganhos hipsométricos, permitindo que a árvore reforce sua posição no dossel superior.

Na modelagem da variável Diâmetro (Figura 14), esta dinâmica estrutural repete-se. Ao longo do eixo do $\Delta FLET$, a linha correspondente aos indivíduos dominados ($dap_3 = 6$ cm) demonstra penalização: a intensificação da mortalidade adjacente traduz-se em perdas incrementais contínuas no dap_6 perante a alteração do microambiente. Assim como verificado na hipsometria, a classe diamétrica média ($dap_3 = 11$ cm) exhibe resiliência paramétrica e insensibilidade a liberação espacial, mantendo a sua trajetória de ganho constante, independentemente do grau de mortalidade na vizinhança. Por outro lado, para a classe de árvores de dimensão inicial máxima ($dap_3 = 17$ cm), a reta projeta uma adição direta e contínua ao diâmetro final.

A visualização conjunta destas interações consolida duas premissas estruturais do povoamento. Primeiro, atesta-se uma divergência alométrica na magnitude da resposta: as variações induzidas pelo alívio competitivo são mais expressivas no diâmetro do que na altura, provando que o ganho de espaço impacta com maior intensidade o crescimento secundário do que o crescimento primário. Segundo, comprova-se que o impacto da mortalidade vizinha é dependente do status fitossociológico prévio do indivíduo. Enquanto o estrato intermediário é insensível ao gradiente de liberação, a intensificação da mortalidade adjacente penaliza as árvores dominadas e associa-se a maiores projeções secundárias apenas para as árvores dominantes. Isso evidencia que a capacidade de converter o intervalo de oportunidade espacial em incremento absoluto é uma vantagem competitiva restrita aos maiores indivíduos da parcela, ancorada em sua prévia captura de recursos.

Figura 13 - Curvas de resposta preditivas do Modelo Linear de Efeitos Mistos para a Altura Total aos 6 anos (ht_6) em função da variação do alívio competitivo ($\Delta FLET$), estratificadas por dimensão hipsométrica inicial (ht_3).

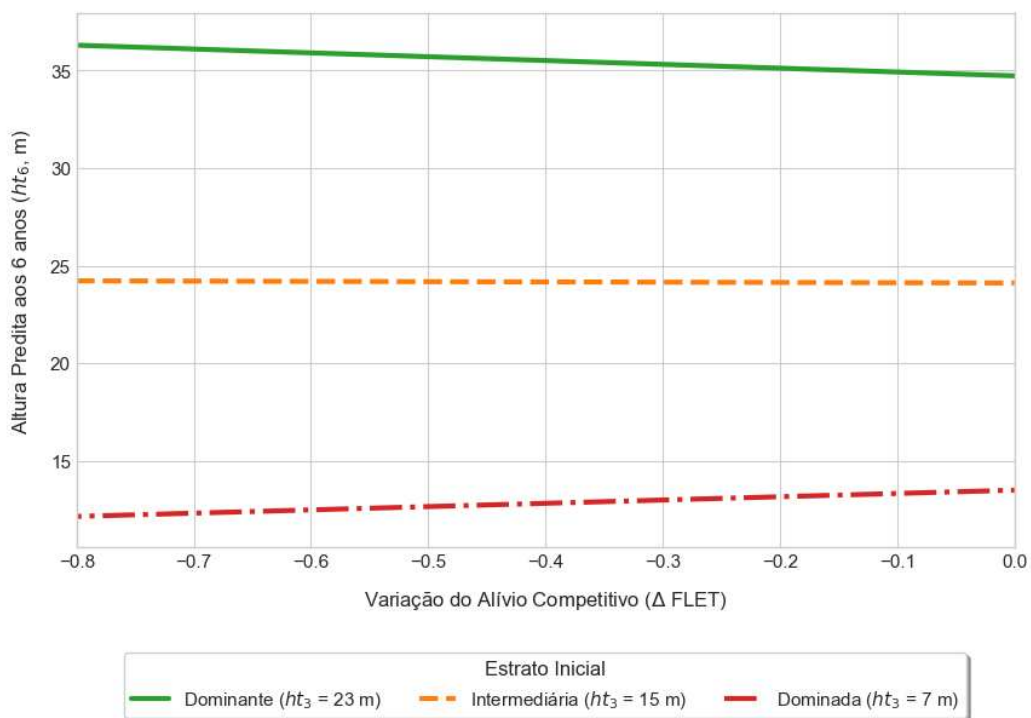
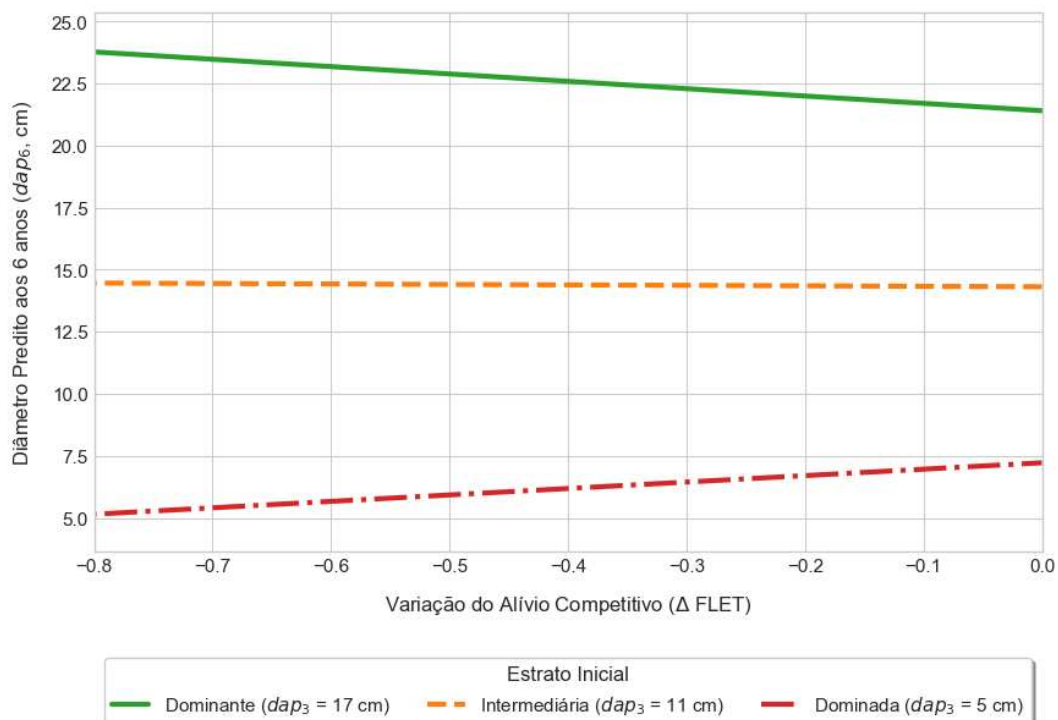


Figura 14 - Curvas de resposta preditivas do Modelo Linear de Efeitos Mistos para a Diâmetro aos 6 anos (dap_6) em função da variação do alívio competitivo ($\Delta FLET$), estratificadas por dimensão diamétrica inicial (dap_3).



4. DISCUSSÃO

4.1. Dinâmica estrutural do povoamento: a estagnação das classes inferiores

Antes de se compreender o efeito da mortalidade no crescimento compensatório, é necessário analisar a diferenciação estrutural intrínseca que ocorre no povoamento ao longo do tempo. Os resultados demonstraram uma heterogeneidade no crescimento individual, na qual a expansão biométrica concentra-se nos indivíduos das classes superiores, enquanto as árvores de menores dimensões reduzem suas taxas de incremento.

Esse comportamento reflete a consolidação da competição assimétrica em povoamentos não desbastados, um padrão amplamente documentado na literatura florestal. Conforme demonstrado por Demolinari (2006), em plantios de eucalipto, à medida que o dossel se fecha, as árvores que garantiram uma ligeira vantagem inicial monopolizam os recursos. Como consequência, as árvores das classes diamétricas inferiores entram em um estado de estagnação, com taxas de crescimento tendendo a zero. Helfenstein (2020) corrobora esse achado ao avaliar a estrutura horizontal de plantios clonais, destacando que a alta densidade acirra a disputa por recursos de forma desigual. As árvores maiores, ao desenvolverem copas dominantes, sombreiam ativamente o estrato inferior, reduzindo a taxa fotossintética das árvores dominadas e forçando-as ao limiar da sobrevivência, o que pode culminar na futura mortalidade.

4.2. Dinâmica espaço-temporal da mortalidade: a influência da capacidade produtiva

A mortalidade observada não ocorreu de forma aleatória no tempo ou no espaço; ela foi condicionada pela capacidade produtiva do local (Índice de Sítio). Constatou-se que, em sítios melhores (I), a mortalidade estabelece-se de forma precoce, porém tende a estabilizar-se, resultando em menores taxas de falhas no final da rotação. Em contrapartida, nos sítios piores (III) o início da mortalidade é mais tardio, mas assume um caráter contínuo e severo.

Esse contraste cronológico e de magnitude encontra respaldo na teoria de relações tamanho-densidade máxima. Em sítios de alta produtividade, o suprimento abundante de recursos (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004) acelera o acúmulo de

biomassa. Consequentemente, o limite de capacidade de suporte e o fechamento do dossel são atingidos muito cedo, antecipando o início da competição assimétrica e do autodesbaste (BURKHART, 2013). No entanto, uma vez que alguns dos indivíduos mais fracos morrem, as árvores dominantes remanescentes possuem a Eficiência do Uso da Luz e da Água para reocupar o espaço (BINKLEY *et al.*, 2010), aliviando a pressão sobre a parcela e estabilizando a curva de sobrevivência.

Por outro lado, no sítio *III*, o crescimento do povoamento é mais lento, resultando em uma dinâmica competitiva menos intensa nos estágios iniciais, o que retarda a mortalidade regular. Contudo, as limitações intrínsecas do ambiente estabelecem um déficit crônico de recursos ao longo de toda a rotação (BOYDEN; BINKLEY, 2016). Como o sítio apresenta restrições para a plena exploração do espaço de crescimento pelos indivíduos dominantes, o estresse fisiológico torna-se persistente, culminando em um declínio populacional gradual e em taxas de mortalidade acentuadas ao final da rotação

4.3. Alometria da resposta compensatória: priorização da expansão cambial

Os resultados deste estudo evidenciam que a mortalidade intraparcela induz uma resposta dendrométrica diferencial nas árvores remanescentes. Observou-se que o crescimento compensatório se manifesta prioritariamente no crescimento secundário, enquanto o crescimento primário permanece pouco alterado e insensível à variação do espaço liberado.

De forma consistente com a literatura consolidada sobre a liberação competitiva, o incremento em diâmetro apresenta um aumento nas bordas da falha enquanto a altura é menos responsiva à liberação competitiva. Essa divergência alométrica é explicada pela flexibilidade de crescimento da árvore em resposta à competição intraespecífica e pela prioridade de drenos metabólicos. Conforme demonstrado por (DEL RÍO *et al.*, 2019), a alometria da copa e do tronco varia com a densidade da floresta: sob alta competição, a árvore prioriza a alocação de carbono para o crescimento primário como estratégia primária de captura de luz. Contudo, a liberação espacial altera o regime de radiação incidente e reduz a competição por espaço físico no entorno da árvore. Isso favorece a manutenção da área foliar em níveis inferiores da copa e estimula a expansão lateral (FORRESTER, 2019). Consequentemente, o incremento em área basal torna-se o principal sumidouro para

a assimilação líquida de carbono, maximizando a eficiência de uso do espaço recém-liberado, com redução do investimento energético no crescimento vertical (OLIVER; LARSON, 1996).

4.4. Capacidade produtiva do sítio como moduladora da resiliência volumétrica

A magnitude da incorporação volumétrica compensatória demonstrou ser estritamente dependente da capacidade produtiva do local. As projeções atestaram que árvores sob alívio competitivo no sítio I capitalizaram um ganho de +9,9% no volume aos 6 anos, enquanto no sítio III esse incremento limitou-se a ganhos marginais (+2,0%).

Em consonância com as sínteses teóricas sobre a capacidade de suporte, ambientes com maior capacidade produtiva promovem uma recuperação mais rápida e de maior magnitude após distúrbios, uma vez que a disponibilidade intrínseca de recursos sustenta altas taxas de assimilação (FORRESTER; ELMS; BAKER, 2013). Em sítios de maior capacidade produtiva a competição interplantas em *Eucalyptus* tende a estabelecer-se precocemente (WEST; SMITH, 2019). Assim, a mortalidade de um vizinho gera um pulso imediato de recursos que é rapidamente convertido em biomassa (STAPE *et al.*, 2010). Por outro lado, no Sítio III, a dinâmica de competição reflete uma limitação intrínseca à capacidade de suporte do sítio, cujos fatores restritivos ao pleno crescimento radicular e foliar impõem um estresse latente sobre a biomassa individual (BOYDEN; BINKLEY, 2016). Conforme modelado por XUE *et al.* (2011) em povoamentos de eucalipto sob autodesbaste, em condições de estresse hídrico ou nutricional, a mortalidade de indivíduos adjacentes não mitiga o déficit crônico da floresta. Nesses cenários, observa-se uma baixa capacidade de resposta produtiva das árvores remanescentes, o que justifica a ineficiência do povoamento em compensar a perda volumétrica decorrente das falhas.

4.5. Hierarquia social e a dualidade da resposta: liberação das dominantes e supressão das inferiores

Um dos resultados mais relevantes e contra-intuitivos desta dissertação reside na interação negativa e significativa entre o tamanho inicial da árvore (dap e h_t) e o índice de alívio competitivo ($\Delta FLET$) ajustada nos Modelos Lineares de Efeitos Mistos

(LMM). As curvas de resposta preditivas evidenciaram que indivíduos pertencentes aos estratos superiores (dominantes) capitalizam os recursos disponibilizados pela falha adjacente, convertendo o espaço em incremento adicional. Inversamente, árvores dominadas não se beneficiam da mortalidade vizinha; de fato, apresentam trajetórias de crescimento penalizadas frente ao evento de falha adjacente.

Essa heterogeneidade polarizada desafia a premissa tradicional de que a liberação de espaço beneficia uniformemente as árvores remanescentes, corroborando de forma contundente as recentes evidências de Chin, Hille Ris Lambers e Franklin (2023). Do ponto de vista ecofisiológico, esse fenômeno é explicado pelas investigações de Binkley (2004) e Binkley *et al.* (2010) sobre a dominância e a eficiência do uso de recursos. Em plantios clonais de *Eucalyptus* no Brasil, Campoe *et al.* (2013) demonstraram que árvores dominantes apresentam maior produtividade não apenas pela maior interceptação luminosa decorrente de sua posição no dossel, mas também por exibirem uma maior eficiência de uso da luz (LUE). Portanto, quando um vizinho morre, ela já se encontra em uma condição fisiológica privilegiada e com maior acesso aos recursos (radiação, água e nutrientes), o que resulta em uma conversão mais eficiente do excedente de recursos em incremento de biomassa lenhosa. A mortalidade vizinha atua como um catalisador para a consolidação de sua dominância (FORRESTER, 2019).

Por outro lado, o desempenho reduzido de árvores dominadas após a ocorrência de falhas adjacentes pode ser atribuído a uma baixa resiliência produtiva (CAMPOE *et al.*, 2013). Indivíduos nestes estratos encontram-se adaptados a condições de sombreamento e menor disponibilidade de recursos. A alteração abrupta no microambiente impõe uma mudança nas condições de crescimento, para a qual esses indivíduos não estão fisiologicamente preparados, resultando em estresse ambiental que penaliza o seu incremento. Adicionalmente, a mortalidade de um vizinho pode romper redes de suporte e interações subterrâneas anteriormente estabelecidas, que auxiliavam a manutenção dessas árvores. Consequentemente, esse desequilíbrio no ambiente radicular impede que a árvore remanescente converta o ganho de espaço em acréscimo de biomassa, corroborando a dificuldade de resposta em indivíduos de estratos inferiores discutida por Chin, Hille Ris Lambers e Franklin (2023).

4.6. Avanços metodológicos na modelagem de vizinhança: LMM e dinâmica transiente

Do ponto de vista biométrico, o estudo supera limitações clássicas ao integrar a regressão não paramétrica espacial (LOESS) e a formulação do Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*). A ocupação de espaços ocioso é um processo dinâmico, o benefício do espaço vizinho liberado decai à medida que a arquitetura radicular e as copas se expandem (POMMERENING; STERBA; WEST, 2022). O índice *FLET* conseguiu capturar essa transitoriedade matemática ao ponderar o alívio não apenas pela distância da falha, mas penalizando-o progressivamente com o tempo de exposição.

A aplicação de Modelos Lineares de Efeitos Mistos demonstrou ser crucial para isolar os efeitos macroambientais dos microambientais. Conforme corroborado por Wu et al. (2022), ao utilizar a parcela como efeito aleatório é possível absorver a heterogeneidade espacial intrínseca da fertilidade do povoamento. Ao ancorar essa variabilidade os coeficientes do ganho de espaço refletirão puramente as interações competitivas assimétricas locais, evitando o viés da pseudoreplicação comum em modelos populacionais agregados (ZUUR et al., 2009).

4.7. Implicações silviculturais e limitações do estudo

As evidências aqui apresentadas possuem implicações diretas para a precisão dos sistemas de prognose florestal. Esse fenômeno de recuperação do espaço ocioso dialoga com as proposições recentes de Pretzsch (2026), acerca do crescimento de povoamentos residuais após reduções de densidade. O autor demonstra que a resiliência do talhão e a aplicabilidade da lei do rendimento final constante dependem intrinsecamente de como as árvores remanescentes capitalizam o espaço deixado pelas que morreram. Simulações operacionais que utilizam apenas a mortalidade geral agregada tendem a subestimar a produtividade, pois ignoram essa resiliência autorregulatória do povoamento residual em mitigar perdas através do crescimento compensatório local.

Apesar dos avanços obtidos na quantificação dendrométrica, este estudo possui limitações inerentes à base de dados de inventário convencional. A ausência de avaliações ecofisiológicas diretas e de biomassa radicular impede o mapeamento

exato da dinâmica de alocação de recursos e das interações abaixo do solo frente às mortalidades no povoamento (CHIN; HILLE RIS LAMBERS; FRANKLIN, 2023). Recomenda-se que pesquisas futuras integrem variáveis de arquitetura de copa (DEL RÍO *et al.*, 2019) e de eficiência de ocupação do espaço para aprofundar a compreensão sobre os mecanismos que regem essa dinâmica espaço-temporal (PRETZSCH, 2026).

5. CONCLUSÃO

O presente estudo comprova a existência e quantifica a dinâmica espaço-temporal do crescimento compensatório em plantios clonais de *Eucalyptus* e *Corymbia*. A partir da integração da regressão espacial não paramétrica (LOESS) com a formulação do Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*) e Modelos Lineares de Efeitos Mistos (LMM), foi possível isolar a capacidade produtiva do macroambiente e demonstrar que o alívio competitivo intrapovoamento é um fenômeno transiente, modulado por fatores estruturais, edáficos e climáticos.

Conclui-se que a resposta biométrica à mortalidade vizinha possui uma divergência alométrica. O excedente de recursos gerado pela mortalidade adjacente é alocado prioritariamente para o crescimento secundário (diâmetro), enquanto o crescimento primário (altura) não sofre alteração significativa pelo alívio competitivo. Ademais, a magnitude dessa resiliência depende da capacidade de suporte do local: sítios de alta capacidade produtiva convertem rapidamente o espaço ocioso em lenho, ao passo que sítios de baixa produtividade apresentam menor capacidade de compensação e sofrem com mortalidade crônica e contínua.

A principal contribuição científica desta pesquisa reside na comprovação de que o alívio competitivo exerce um impacto polarizado, dependente da posição fitossociologia prévia do indivíduo. A capacidade de converter o espaço ocioso em incremento absoluto é uma vantagem competitiva restrita às árvores dominantes. De forma contra-intuitiva e desafiando premissas clássicas, comprovou-se que árvores dominadas não se beneficiam da mortalidade vizinha, apresentando supressão dimensional adicional. Esse declínio pode ser atribuído a alterações nas condições do micro-sítio e na dinâmica local de recursos.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que simulações e inventários florestais que consideram apenas taxas médias de mortalidade agregada podem

tender a subestimar a produtividade final do povoamento. Para o aprimoramento do manejo florestal e algoritmos de desbaste, é fundamental que os sistemas de prognose incorporem a arquitetura espacial da mortalidade e o estrato fitossociológico da árvore afetada. Trabalhos futuros devem aliar essa nova modelagem espacial a avaliações ecofisiológicas e morfológicas, elucidando os fatores que regem a supressão e a eficiência do uso de recursos.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BINKLEY, D. A. hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. **Forest Ecology and Management**, v. 190, n. 2, p. 265–271, 2004.
- BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; BAUERÇE, W. L.; RYAN, M. G. Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1704–1713, 2010.
- BOYDEN, S.; BINKLEY, D. The effects of soil fertility and scale on competition in ponderosa pine. **European Journal of Forest Research**, v. 135, n. 1, p. 153–160, 2016.
- BURKHART, H. E. Comparison of maximum size–density relationships based on alternate stand attributes for predicting tree numbers and stand growth. **Forest Ecology and Management**, v. 289, p. 404–408, 2013.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. Dordrecht: Springer, 2012.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 6.ed. atualizada e ampliada. Editora UFV: Viçosa, Brasil, 2025.
- CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; BAUERLE, W. L.; BINKLEY, D.; LE MAIRE, G. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 14–20, 2013.
- CHIN, A. R. O.; HILLE RIS LAMBERS, J.; FRANKLIN, J. F. Context matters: Natural tree mortality can lead to neighbor growth release or suppression. **Forest Ecology and Management**, v. 529, p. 120735, 2023.
- CLEVELAND, W. S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. **Journal of the American Statistical Association**, v. 74, n. 368, p. 829–836, 1979.
- CLIMATE-DATA.ORG. **Dados climáticos para cidades mundiais**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/>. Acesso em: 21 jul. 2026.
- DEL RÍO, M.; BRAVO-OVIEDO, A.; RUIZ-PEINADO, R.; CONDÉS, S. Tree allometry variation in response to intra- and inter-specific competitions. **Trees**, v. 33, n. 1, p. 121–138, 2019.

DEMOLINARI, R. A. **Crescimento de povoamentos de eucalipto não-desbastados**. 2006. 102 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of the World's Forests 2022: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies**. Roma: FAO, 2022.

FEKETY, P. A.; CROOKSTON, N. L.; HUDAK, A. T.; FILIPPELLI, S. K.; VOGELER, J. C.; FALKOWSKI, M. J. Hundred year projected carbon loads and species compositions for four National Forests in the northwestern USA. **Carbon Balance and Management**, v. 15, n. 1, p. 1–18, 2020.

FORRESTER, D. I.; ELMS, S. R.; BAKER, T. G. Tree growth-competition relationships in thinned *Eucalyptus* plantations vary with stand structure and site quality. **European Journal of Forest Research**, v. 132, n. 2, p. 241-252, 2013.

FORRESTER, D. I. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. **Forest Ecology and Management**, v. 312, p. 282–292, 2014.

FORRESTER, D. I. Linking forest growth with stand structure: Tree size inequality, tree growth or resource partitioning and the asymmetry of competition. **Forest Ecology and Management**, v. 447, p. 139–157, 2019.

GÓMEZ-APARICIO, L.; GARCÍA-VALDÉS, R.; RUIZ-BENITO, P.; ZAVALA, M. A. Disentangling the relative importance of climate, size and competition on tree growth in Iberian forests: implications for forest management under global change. **Global Change Biology**, v. 17, n. 7, p. 2400–2414, 2011.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013.

HELFENSTEIN, G. O. **Produtividade e estrutura horizontal de povoamentos clonais de eucalipto em diferentes sítios e espaçamentos de plantio**. 2020. 40 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 21 jul. 2026.

MEHTÄTALO, L.; LAPPI, J. **Biometry for forestry and environmental data: with examples in R**. Boca Raton: CRC Press, 2020.

OLIVER, C. D.; LARSON, B. C. **Forest stand dynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

PINHEIRO, J.; BATES, D. **nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models**. R package version 3.1-169. 2026. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>. Acesso em: 27 abr. 2026.

POMMERENING, A.; STERBA, H.; WEST, P. Sampling theory inspires quantitative forest ecology: The story of the relascope kernel function. **Ecological Modelling**, v. 464, p. 109843, 2022.

PRETZSCH, H. **Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model**. Berlin: Springer, 2009.

PRETZSCH, H. On the distribution of growth among the trees in a stand and the dependency of the ratio of distribution on the respective site conditions. **Allgemeine Forst- und Jagdzeitung**, v. 181, n. 7/8, p. 128–137, 2010.

PRETZSCH, H. Growth of residual forest stands after severe density reduction due to natural disturbances and silvicultural interventions. **Forest Ecology and Management**, v. 609, p. 123627, 2026.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Viena: **R Foundation for Statistical Computing**, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 27 abr. 2026.

RESENDE, R. T. **Micro- and macro-site variants on genotype by environment interaction in *Eucalyptus* spp.** 2019. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.

SCHWERZ, F.; DOURADO NETO, D. D.; CARON, B. O.; NARDINI, C.; SGARBOSSA, J.; ELOY, E.; BEHLING, A.; ELLI, E. F.; REICHARDT, K. Biomass and potential energy yield of perennial woody energy crops under reduced planting spacing. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1238-1250, 2020.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry**, v. 81, n. 1, p. 13–31, 2008.

SOARES, A. A. V. **Efeito da heterogeneidade estrutural na produtividade e na dinâmica do crescimento de povoamentos monoclonais de eucalipto**. 2017. 52 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 2004.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. de A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v. 35, n. 3, p. 816–831, 1989.

WEINER, J. Asymmetric competition in plant populations. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 5, n. 11, p. 360–364, 1990.

WEST, P. W.; SMITH, R. G. B. Inter-tree competitive processes during early growth of an experimental plantation of *Eucalyptus pilularis* in sub-tropical Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 451, p. 117450, 2019.

WU, Z.; FAN, C.; ZHANG, C.; ZHAO, X.; GADOW, K. von. Effects of biotic and abiotic drivers on the growth rates of individual trees in temperate natural forests. **Forest Ecology and Management**, v. 503, p. 119800, 2022.

XUE, L.; PAN, L.; ZHANG, R.; XU, P. Density effects on the growth of self-thinning *Eucalyptus urophylla* stands. **Trees**, v. 25, n. 6, p. 1021–1031, 2011.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; WLAKER, N.; SABELIEV, A. A.; SMITH, G. M. **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. New York: Springer, 2009.

CAPÍTULO 2. *FORESTSIM*: CONCEPÇÃO, ARQUITETURA E APLICAÇÃO DE UM SIMULADOR *WEB* ESPACIALMENTE EXPLÍCITO PARA O MANEJO FLORESTAL

RESUMO

O manejo estratégico de florestas equiâneas demanda estimativas rigorosas que tradicionalmente ignoram a complexidade espacial e estocástica das perdas de campo, subestimando a capacidade de resposta do povoamento. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar o *ForestSIM*, um simulador florestal fundamentado em Modelos de Árvore Individual Espacialmente Explícitos (MAIEE). O sistema integrou o Índice de Pressão de Vizinhança (IPV) e o Fator de Liberação Espaço-Temporal (FLET), processados via Python e otimizados pelo algoritmo de Brent para a estimação do coeficiente de resposta produtiva. A validação ocorreu por meio de simulações de Monte Carlo em plantios clonais de *Eucalyptus* avaliando múltiplos cenários com variação na intensidade e na idade de ocorrência da mortalidade. Os resultados atestaram a consistência técnica do modelo, que evidenciou ganhos de volume (até 28%) em árvores adjacentes às falhas, contrastando com a estabilidade hipsométrica. O modelo quantificou a habilidade de ocupação do espaço disponível, comprovando que o povoamento é capaz de compensar mortalidades precoces de até 10% de intensidade; contudo, essa capacidade produtiva reduz-se perante a mortalidade em fase tardia ou quando assumem distribuição espacial agregada. Conclui-se que o *ForestSIM* supera as limitações de modelos convencionais, oferecendo aos gestores uma ferramenta preditiva flexível, capaz de quantificar o risco silvicultural e demonstrar que a distribuição espacial da mortalidade é determinante para a produtividade final do povoamento.

Palavras-chave: Modelagem Espacialmente Explícita; Competição Intraespecífica; Simulação Estocástica.

1. INTRODUÇÃO

O manejo estratégico de plantios comerciais de *Eucalyptus* de alta produtividade demanda estimativas volumétricas rigorosas e contínuas no tempo. Tradicionalmente, a biometria florestal tem se apoiado em modelos em nível de povoamento para projetar o crescimento e a produção dos povoamentos (CAMPOS; LEITE, 2025; BURKHART; TOMÉ, 2012). Embora eficiente para condições de elevada homogeneidade, essa abordagem estruturalmente agregada falha ao tentar capturar a complexidade estocástica e a espacial de processos de mortalidade na malha de plantio (WEISKITTEL *et al.*, 2011).

A mortalidade florestal, seja ela decorrente da exclusão competitiva assimétrica (autodesbaste natural) ou induzida por distúrbios bióticos e abióticos, altera drasticamente a matriz espacial do povoamento. A supressão de um indivíduo gera uma área ociosa, provocando a redistribuição espacial de recursos ecofisiológicos limitantes, notadamente a radiação solar fotossinteticamente ativa, a água e os nutrientes edáficos, para a circunvizinhança da falha (PRETZSCH, 2009). Como resposta ao súbito alívio no estresse competitivo microambiental, as árvores adjacentes aceleram suas taxas de incremento radial, configurando um mecanismo de resiliência produtiva conhecido como crescimento compensatório (MEDHURST; BEADLE; NEILSEN, 2001). Uma vez que a magnitude desta resposta biológica é governada primordialmente pela distância entre os indivíduos remanescentes e pela intensidade da abertura local, a modelagem preditiva fidedigna desse processo exige a adoção de Modelos de Árvore Individual Espacialmente Explícitos (MAIEE).

Um MAIEE opera em um grau máximo de resolução biológica, utilizando coordenadas cartesianas e índices de competição dependentes da distância para emular a dinâmica de cada árvore como uma entidade autônoma e interativa (PORTÉ; BARTELINK, 2002). No entanto, a transposição desses modelos para a silvicultura operacional tem esbarrado em restrições técnicas e de usabilidade. Tais arquiteturas matemáticas exigem elevado processamento matricial e, historicamente, permanecem encapsuladas em códigos de programação complexos e estáticos, isolados da rotina do gestor florestal. Como consequência, observa-se na literatura uma lacuna no desenvolvimento de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) que possuam interfaces amigáveis e reativas (KANGAS; KANGAS; KURTTILA, 2015). Pesquisadores e silvicultores carecem de ferramentas pragmáticas que permitam

testar, de modo dinâmico, múltiplos cenários de mortalidade estocástica e avaliar o crescimento compensatório em tempo real, sem a obrigatoriedade de proficiência em ciências de dados ou linguagens algorítmicas.

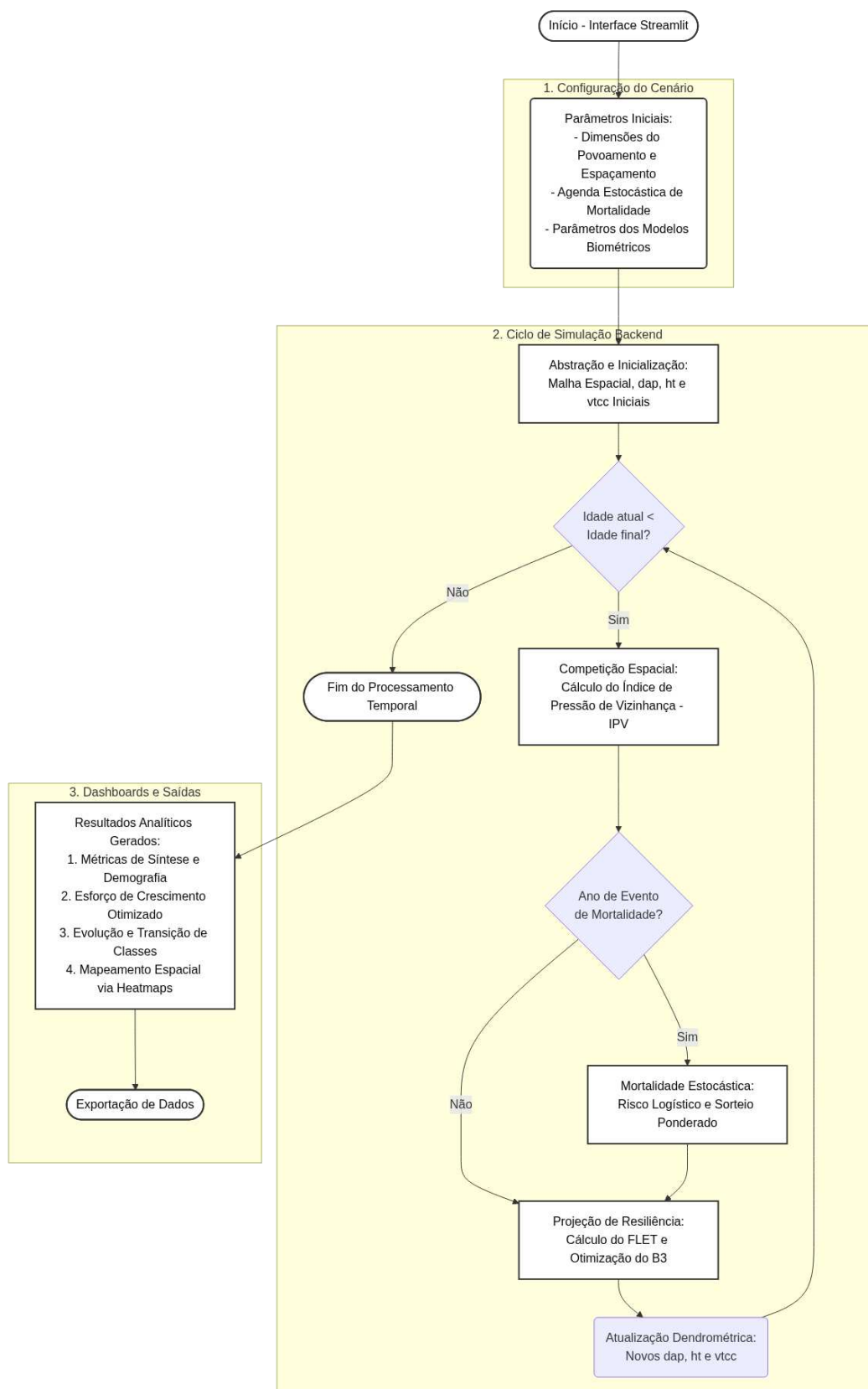
Diante desta problemática metodológica e da demanda tecnológica por sistemas analíticos interativos, o objetivo deste trabalho foi propor, desenvolver e validar o *ForestSIM*: um simulador florestal *web* espacialmente explícito. A ferramenta foi concebida para integrar a modelagem quantitativa da competição espacial, os processos estocásticos de mortalidade e a otimização matemática não linear para a estimativa da resiliência produtiva via algoritmos numéricos. Ao converter modelos dependentes da distância em uma interface computacional em nuvem, o sistema visa prover um laboratório virtual, permitindo aos usuários quantificar o crescimento compensatório de forma preditiva e maximizar a eficiência do manejo da resiliência em plantios florestais.

2. MODELO CONCEITUAL DO SIMULADOR

A modelagem de sistemas silviculturais complexos requer a transposição de interações populacionais e estruturais para um ambiente lógico estruturado. Para atender a essa premissa, o simulador foi arquitetado sob o paradigma dos Modelos de Árvore Individual Espacialmente Explícitos (MAIEE) (PRETZSCH, 2009). Diferentemente dos modelos em nível de povoamento, que tratam a floresta como uma unidade homogênea, a abordagem espacialmente explícita discretiza o talhão, reconhecendo que os recursos do sítio são finitos e distribuídos assimetricamente. Nesta estrutura, cada árvore atua como uma entidade autônoma que afeta e é afetada pelas condições locais de sua microvizinhança (BURKHART; TOMÉ, 2012).

O modelo conceitual do sistema foi particionado em cinco módulos sequenciais interdependentes, desenhados para emular a cronologia biológica do povoamento: estruturação espacial, inicialização dendrométrica, mapeamento do estresse competitivo, supressão estocástica e, por fim, a resposta compensatória. A arquitetura lógica que integra essas etapas, desde a inserção dos parâmetros iniciais até a geração dos resultados analíticos, está esquematizada no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da arquitetura e funcionamento do simulador *ForestSIM*, detalhando as etapas de configuração do cenário, o ciclo de processamento e simulação espacial (*backend*) e a emissão dos resultados analíticos (dashboards e saídas).



2.1. Abstração do ambiente florestal

A base espacial do simulador consiste na conversão do espaço físico contínuo de um talhão comercial para um ambiente virtual discreto. O terreno é abstraído como uma "Malha Espacial" ortogonal bidimensional, constituída por uma matriz de dimensões $n \times m$, onde n representa o número de linhas de plantio e m o número de plantas por linha. Nesta estrutura matricial, cada célula de coordenada (i, j) corresponde ao nicho espacial teórico de uma única árvore. A geometria da matriz é regida estritamente pelas diretrizes do planejamento silvicultural adotado, utilizando o espaçamento entre linhas (d_{linha}) e o espaçamento entre plantas na linha (d_{planta}) para definir os vetores de distância euclidiana. Consequentemente, a distância diagonal geométrica (d_{diag}) entre covas não ortogonais é fixada pelo Teorema de Pitágoras. Esta abstração garante que as interações modeladas posteriormente respeitem a física do arranjo espacial imposto no momento do plantio.

2.2. Módulo de inicialização biométrica

Para que as projeções sejam válidas, o modelo não assume a premissa de que todas as árvores possuem dimensões idênticas. A variabilidade natural do povoamento inicial é emulada por meio da função de densidade de probabilidade (f.d.p) de Weibull, clássica na biometria florestal por sua flexibilidade em descrever estruturas diamétricas de plantios equiâneos (BAILEY; DELL, 1973). A distribuição do diâmetro a 1,3 m de altura (dap) no instante inicial é gerada estocasticamente pela função de densidade de probabilidade (Equação 1):

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma} \right] \quad (\text{Eq. 1})$$

em que x é a variável aleatória (dap), γ é o parâmetro de forma (responsável por definir a assimetria da curva em povoamentos jovens ou maduros) e β é o parâmetro de escala.

Uma vez alocados os diâmetros nas posições espaciais (i, j) da malha, o módulo infere a Altura Total (h_t) e o Volume Individual (v_{tcc}) por meio de relações alométricas consolidadas (CAMPOS; LEITE, 2025) (Equação 2 e 3). Este

procedimento instaura a heterogeneidade biométrica inicial, uma condição fundamental para o desencadeamento da assimetria competitiva.

$$\ln(h_t) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \varepsilon \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\ln(v_{tcc}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \beta_2 \ln(h_t) + \varepsilon \quad (\text{Eq. 3})$$

em que: h_t é a altura total (m); v_{tcc} é o volume individual (m^3); dap é o diâmetro a 1,30 m de altura (cm); β_0 , β_1 e β_2 são os parâmetros das equações; e ε representa o erro aleatório associado às estimativas.

2.3. Módulo de competição espacial

A mensuração da competição intraespecífica pelos recursos do sítio é modelada pelo Índice de Pressão de Vizinhaça (*IPV*). Este índice fundamenta-se na premissa de que a área de captação de recursos de uma árvore-sujeito é dinamicamente contraída ou expandida com base no porte e na proximidade de seus vizinhos adjacentes (TOMÉ; BURKHART, 1989).

Para delimitar a zona de interação competitiva, o simulador emprega a Vizinhaça de Moore (raio de *Chebyshev* igual a 1), avaliando os oito vizinhos circundantes diretos, ortogonais e diagonais da malha espacial. O *IPV* é calculado para cada árvore-alvo ponderando-se sua própria dimensão basal contra a pressão competitiva exercida pela área basal de seus vizinhos vivos. Para refletir a atenuação espacial da competição, essa pressão é moderada pelo inverso da distância euclidiana geométrica que os separa, garantindo que vizinhos ortogonais mais próximos inflijam maior restrição do que vizinhos nas diagonais.

A formulação matricial implementada no motor do simulador é expressa pela Equação 4:

$$IPV_{i,j} = \frac{g_{i,j}}{\left(\frac{\sum_{k=1}^n g_k w_k}{\sum_{k=1}^n w_k} \right) + \epsilon} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que: $IPV_{i,j}$ é o Índice de Pressão de Vizinhaça da árvore-sujeito na posição cartesiana (i,j) da malha; $g_{i,j}$ é a área basal da árvore-sujeito; g_k é a área basal do k -ésimo vizinho competidor vivo; n é o número de vizinhos interceptados na vizinhaça de Moore (máximo de 8); w_k é o peso ou fator de atenuação espacial, equivalente ao

inverso da distância ($w_k = 1/d_{linha}, 1/d_{planta}$ ou $1/d_{diag}$); ϵ é uma constante infinitesimal computacional inserida no denominador para evitar indeterminações algébricas (erros de divisão por zero) em cenários onde a árvore fique em isolamento absoluto após eventos severos de mortalidade.

Sob esta arquitetura matemática, a competição espacial traduz-se em um balanço de forças localizado. Árvores dominantes, que possuem área basal superior à pressão média ponderada de sua vizinhança imediata, superam a concorrência e apresentam valores de *IPV* maiores que 1. Em contrapartida, árvores dominadas, sob estresse microambiental, sucumbem à pressão dos vizinhos e apresentam valores fracionários que se aproximam assintoticamente de zero.

2.4. Módulo de mortalidade estocástica

Diferente das perdas sistemáticas por desbaste, a mortalidade natural ou regular manifesta-se no modelo como um evento estocástico direcionado pelo vigor do indivíduo (VANCLAY, 1994). Nas idades designadas para a ocorrência do evento, o simulador estabelece uma cota global de mortalidade (uma proporção da população viva a ser removida) e distribui esse risco com base na desvantagem competitiva mapeada pelo módulo anterior.

A suscetibilidade à mortalidade (P_m) de cada árvore (i, j) é descrita por um modelo de regressão logística dependente da pressão competitiva da vizinhança (Equação 5):

$$P_m = \frac{1}{1 + e[-(\beta_0 + \beta_1 IPV)]} + \epsilon \quad (\text{Eq. 5})$$

Nesta função, os coeficientes β_0 e β_1 calibram a inclinação do risco: árvores sob dominância (menores valores de *IPV*) recebem valores mais altos, enquanto indivíduos dominantes apresentam suscetibilidade mínima. Para materializar a morte na malha, o sistema não avalia as árvores por limiares isolados, mas sim de forma sistêmica e competitiva. As probabilidades logísticas de todos os indivíduos vivos são normalizadas pelo somatório total da floresta, convertendo-se em pesos estatísticos.

Em seguida, o algoritmo executa um sorteio aleatório ponderado sem reposição, selecionando exatamente a quantidade de árvores estipulada pela meta daquela idade. Os indivíduos sorteados são então computacionalmente suprimidos

(seus atributos biométricos são convertidos a falhas matriciais). Este arranjo garante que a meta quantitativa de declínio populacional seja atingida, ao mesmo tempo em que preserva a estocasticidade do processo, permitindo que múltiplas rodadas com os mesmos parâmetros gerem reboleiras de mortalidade espacilmente distintas, respeitando a entropia observada em ecossistemas reais.

2.5. Módulos de projeção de crescimento e resiliência

O espaço liberado provocado pelas supressões estocásticas desarticula o equilíbrio competitivo do povoamento, alterando a partição de recursos e a dinâmica de crescimento local. Para modelar a capitalização de recursos desse evento pelas árvores sobreviventes, o sistema formula o Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*). A fundamentação fator repousa na incorporação da dimensão temporal à dinâmica espacial: a resiliência produtiva não se manifesta de forma instantânea; ela é um processo gradativo que se intensifica à medida que os sistemas radiculares e as copas das árvores remanescentes ocupam fisicamente as lacunas deixadas pelas falhas (MEDHURST; BEADLE; NEILSEN, 2001).

Para refletir essa dinâmica de forma preditiva e estruturada, o simulador utiliza como motor algorítmico o modelo autorregressivo de árvore individual proposto por Pienaar e Shiver (1981). O sistema projeta o estado futuro da floresta em dois eixos complementares:

2.5.1. Projeção diamétrica e resiliência espacial

O diâmetro futuro (dap_2) é estruturado em função do diâmetro atual (dap_1), do tempo transcorrido e da métrica de liberação. O diferencial desta etapa reside na inclusão do termo aditivo compensatório no expoente da função, conforme a Equação 6:

$$dap_2 = dap_1 e \left[\beta_1 (Idade_2^{\beta_2} - Idade_1^{\beta_2}) + \beta_3 FLET \right] + \varepsilon \quad (\text{Eq. 6})$$

em que β_1 e β_2 regem o incremento natural intrínseco ao sítio e o parâmetro β_3 modula a resposta do crescimento à mortalidade adjacente.

2.5.2. Projeção da altura total

Paralelamente à dinâmica diamétrica, o sistema executa a atualização temporal da altura total (h_{t_2}). Diferente do diâmetro, o crescimento em altura em povoamentos equiâneos de *Eucalyptus* é mais resiliente a variações na densidade do povoamento e aos efeitos de competição localizada (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Consonante a esse princípio, a projeção da altura no simulador é estruturada de forma determinística, dependente do tempo, sem a inclusão de termos compensatórios espaciais. A trajetória de crescimento em altura é projetada por:

$$h_{t_2} = h_{t_1} e \left[\beta_1 (Idade_2^{\beta_2} - Idade_1^{\beta_2}) \right] + \varepsilon \quad (\text{Eq. 7})$$

em que h_{t_2} e h_{t_1} representam a altura total projetada e atual, respectivamente, e os coeficientes β_1 e β_2 definem o potencial de crescimento hipsométrico para o material genético e sítio avaliados.

A integração dessas duas trajetórias de crescimento permite que o simulador atualize, a cada passo de tempo, o volume individual de cada árvore através do modelo de Schumacher-Hall (previamente descrito na Equação 3), utilizando os novos valores de dap_2 e h_{t_2} . Essa estrutura modular flexível garante que o incremento volumétrico final do povoamento seja o resultado direto da interação entre a trajetória natural de crescimento das árvores em determinado sítio e a intensidade contínua do alívio competitivo provido pelo *FLET*, fornecendo o embasamento matemático necessário para simular a recuperação produtiva do povoamento após eventos de mortalidade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A transposição do modelo conceitual e matemático para um ambiente virtual exigiu o delineamento de uma arquitetura de *software* robusta e cientificamente validada. O desenvolvimento do simulador priorizou a utilização de técnicas de código aberto (*open-source*), visando garantir a reprodutibilidade metodológica, a transparência dos algoritmos e a democratização do acesso à ferramenta pelos gestores florestais e pesquisadores. A seguir, são detalhadas e justificadas as bibliotecas e estruturas computacionais adotadas para a implementação do *ForestSIM*.

3.1. Linguagem de Programação Python

O núcleo algorítmico do simulador (*backend*) foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python. A escolha pelo Python justifica-se por sua consolidação contemporânea como a linguagem padrão no ecossistema de computação científica e ciência de dados (VIRTANEN et al., 2020). Ela oferece um ambiente de alto nível que permite a tradução quase literal de formulações matemáticas complexas (como as equações preditivas e os modelos logísticos de mortalidade) para rotinas de código auditáveis. Além disso, a sua arquitetura multiparadigma viabilizou a estruturação do simulador combinando a eficiência do paradigma funcional, essencial para os cálculos espaciais da vizinhança, com da orientação a objetos, necessária para o gerenciamento das estruturas de dados intrínsecas ao talhão florestal ao longo do tempo.

3.2. Estrutura de interface web

Embora os Modelos de Árvore Individual Espacialmente Explícitos (MAIEE) apresentem um rigor biológico superior, sua adoção operacional esbarra na ausência de interfaces de usuário (GUI) acessíveis, restringindo a execução dos modelos a pesquisadores proficientes em programação (KANGAS; KANGAS; KURTTILA, 2015). Para superar essa barreira, empregou-se o *framework Streamlit*.

O *Streamlit* atua como o tradutor tecnológico que converte o motor biométrico em uma Aplicação Web (*Web App*) interativa (*frontend*). Por meio dessa estrutura, o usuário consegue parametrizar a simulação, inserindo distâncias de plantio, manipulando a agenda de mortalidade estocástica e recalibrando os parâmetros das equações de projeção, sem interagir diretamente com o código-fonte. A capacidade de implantação do *Streamlit* em ambientes de nuvem (*cloud computing*) garante que as simulações sejam processadas em servidores remotos, exigindo do usuário final apenas um navegador web padrão para acessar e testar cenários de resiliência florestal em tempo real.

3.3. Algoritmos de otimização

A modelagem do crescimento compensatório exigiu a determinação exata do fator de resiliência (β_3), o qual calibra a reatividade das árvores vizinhas ao Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*). A busca por esse coeficiente não poderia ser empírica ou exaustiva. Por isso ela foi modelada como um problema matemático de busca de raízes (*root-finding problem*), onde a função objetivo visa anular a diferença (erro zero) entre o volume total do povoamento compensado e uma meta produtiva estipulada.

Para solucionar este sistema não linear dinâmico, o simulador acopla a biblioteca *SciPy*, dedicada à computação científica avançada (VIRTANEN et al., 2020). Utilizou-se o solver ancorado no método numérico de Brent (*Brent's method*). A escolha por este algoritmo se dá, pois ele combina o método da bisseção, o método da secante e a interpolação quadrática inversa para garantir uma convergência rápida e segura (BRENT, 1973). O limite de tolerância de erro absoluto foi restringido a 1×10^{-12} , conferindo precisão rigorosa à estimativa algébrica do esforço compensatório exigido pela matriz remanescente.

3.4. Manipulação e visualização de dados

A implementação de um modelo espacialmente explícito gera um volume massivo de cálculos de vizinhança a cada intervalo de tempo simulado. O uso de laços de repetição tradicionais resultaria em ineficiência computacional. Dessa forma, as matrizes espaciais do talhão foram estruturadas e operadas por meio da biblioteca *NumPy*. Baseada na vetorização de matrizes (HARRIS et al., 2020), o *NumPy* processa simultaneamente a penalização do Índice de Pressão de Vizinhança (*IPV*) e o alívio provido pelo *FLET* para todas as células da malha em frações de segundo. O armazenamento e o rastreamento temporal dos dados biométricos de cada indivíduo (diâmetro, altura e volume) foram gerenciados pela biblioteca *Pandas* (MCKINNEY, 2010), responsável por compilar o histórico de vida da floresta em arquivos relacionais formatados para exportação pelo usuário.

Por fim, a interpretação da dinâmica microambiental foi traduzida graficamente pelas bibliotecas *Seaborn* e *Matplotlib* (HUNTER, 2007). O sistema de visualização gera instantaneamente representações cartográficas matriciais na forma de Mapas de

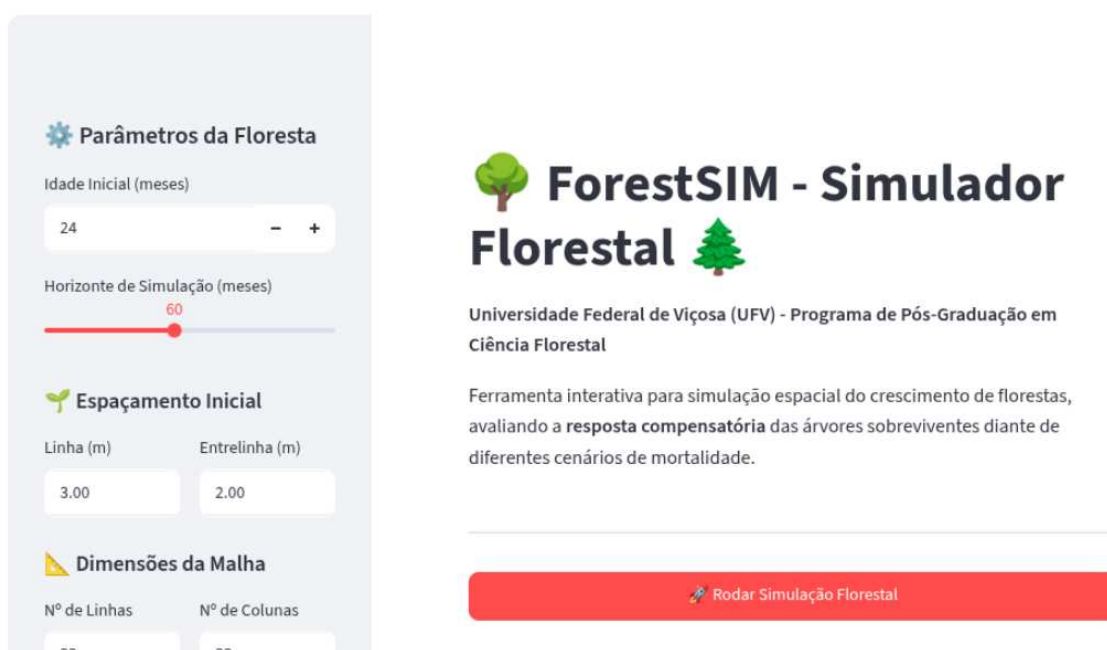
Calor (*heatmaps*). Estes mapas convertem a matriz numérica gerada pelo *NumPy* em gradientes de cor, permitindo aos pesquisadores visualizar a distribuição espacial exata das falhas estocásticas (cicatrices de mortalidade) e mapear as zonas de liberação de recursos ao redor das falhas estruturais formadas no povoamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. O sistema desenvolvido

A materialização do arcabouço matemático e ecológico consolidou-se no *ForestSIM*, um simulador florestal dinâmico hospedado em nuvem. O sistema foi projetado para atuar como um laboratório virtual interativo, rompendo a barreira da programação algorítmica ao oferecer uma Interface Gráfica do Usuário (GUI) intuitiva e cientificamente rigorosa. Nesta seção, apresenta-se a arquitetura de interação do *software*, detalhando o fluxo paramétrico de entrada (*inputs*) e a estruturação dos painéis analíticos (*dashboards*) gerados após o processamento da simulação de resiliência espacial (Figura 1).

Figura 1 - Tela principal do sistema *ForestSIM*. À esquerda, observa-se o menu de inputs contendo os blocos lógicos para configuração do espaçamento, mortalidade e parâmetros biométricos; ao centro, a área reservada para a geração do dashboard analítico e dos mapas de calor.



4.1.1. Configuração do cenário

A parametrização do talhão virtual foi concentrada em um painel lateral (Figura 2), preservando a área principal da tela para a renderização limpa dos resultados métricos. A interface de entrada de dados foi estruturada em blocos lógicos sequenciais, permitindo a configuração exaustiva do ambiente simulado.

O usuário inicia a modelagem definindo a janela temporal (Idade Inicial e Horizonte de Simulação, em meses) e a base geométrica da floresta por meio dos "Parâmetros do Talhão" e "Espaçamento Inicial". Ao inserir as distâncias entre linhas e entrelinhas (em metros) e as dimensões da malha matricial, o sistema calcula e exibe de forma reativa a "População Inicial" absoluta e a "Área Simulada" (hectares ou metros quadrados), auxiliando o pesquisador a escalar a abstração para parcelas de inventário ou povoamentos contínuos.

O núcleo de perturbação do sistema localiza-se no módulo "Eventos de Mortalidade". O *ForestSIM* substitui a clássica taxa média de mortalidade anual por uma agenda estocástica flexível, na qual o gestor cadastra eventos de mortalidade pontuais, definindo a idade de ocorrência e a proporção de supressão da malha (%). Em conjunto, o bloco de "Resiliência (Fator Compensatório)" confere dupla funcionalidade à ferramenta: o usuário pode instruir o solver matemático a encontrar o β_3 ideal que garanta a recuperação total da meta volumétrica, ou operar em modo preditivo, inserindo um β_3 empírico conhecido para avaliar qual será a taxa real de recuperação do talhão. Por fim, visando garantir a auditabilidade científica, implementou-se um controle de semente algorítmica (*seed locking*), garantindo que rodadas de simulação sob a mesma semente gerem a mesma floresta e malha de falhas.

Um diferencial arquitetônico para a utilidade científica e flexibilidade do *ForestSIM* reside na sua total transparência algorítmica ("caixa-branca"). Oculto por padrão em um menu expansível para otimizar a ergonomia visual, o bloco "Parâmetros Biométricos (Modelos)" expõe o núcleo matemático do sistema (Figura 3). Para cada relação alométrica e probabilística empregada, abrangendo a função de densidade de Weibull de dois parâmetros para a geração diamétrica inicial, o modelo volumétrico de dupla entrada de Schumacher-Hall, a relação hipsométrica e as equações preditivas de incremento, a interface renderiza a formulação exata utilizada pelo motor de processamento.

O *software* não restringe a modelagem aos coeficientes nativos obtidos para o estudo de caso desta pesquisa. O painel faculta a sobressubscrição dinâmica de todos os parâmetros associados ($\gamma, \beta, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, etc$). Essa versatilidade computacional viabiliza a calibração do simulador para diferente espécies e qualidades de sítio (índices de local). Ao permitir que os gestores insiram coeficientes ajustados a partir de seus próprios inventários florestais contínuos, o sistema assegura universalidade metodológica e máxima aderência às condições específicas de manejo operacional.

Figura 3 - Painel expansível de parâmetros biométricos do simulador *ForestSIM*, exibindo as formulações matemáticas renderizadas e os campos interativos para a calibração dos coeficientes alométricos, preditivos e de mortalidade.

Parâmetros Biométricos (Modelos)

Altere os coeficientes para calibrar o simulador para o seu povoamento específico.

1. Distribuição Inicial (Weibull 2P)

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma}}$$

Gamma (Forma)

8,882151 - +

Beta (Escala)

11,368466 - +

2. Volume (Schumacher-Hall)

$$\ln(v) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap) + \beta_2 \ln(ht)$$

B0 Volume

-9,962793 - +

B1 Volume

2,128458 - +

B2 Volume

0,787242 - +

3. Hipsométrica Inicial

$$\ln(ht) = \beta_0 + \beta_1 \ln(dap)$$

B0 ht Inicial

-0,355914 - +

B1 ht Inicial

1,282668 - +

4. Projeção de dap (Modelo Base)

$$dap_2 = dap_1 \cdot e^{\left[\beta_1 (Idade_2^{\beta_2} - Idade_1^{\beta_2})\right]}$$

B1 Proj. dap

-9,533596 - +

B2 Proj. dap

-0,812691 - +

5. Projeção de Altura Total

$$ht_2 = ht_1 \cdot e^{\left[\beta_1 (Idade_2^{\beta_2} - Idade_1^{\beta_2})\right]}$$

B1 Proj. ht

-10,332914 - +

B2 Proj. ht

-0,626933 - +

6. Risco de Mortalidade (Logística)

$$P(m) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \cdot IPV)}}$$

B0 Mortalidade

-0,8852 - +

B1 Mortalidade (Peso IPV)

-6,1832 - +

4.1.2. Saídas e acompanhamento do sistema

Ao disparar a execução computacional, o *backend* matricial constrói a floresta, aplica o Índice de Pressão de Vizinhança (*IPV*), processa a mortalidade dependente da distância e projeta o Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*). A compilação desses processos é apresentada ao usuário na forma de um *dashboard* estruturado em quatro eixos de análise.

4.1.2.1. Métricas de síntese e demografia

O painel superior atua como a síntese de performance produtiva (KPIs) (Figura 4). O sistema estipula o "Volume Ideal" (cenário controle, com 100% de sobrevivência) e confronta com as projeções do cenário contendo o distúrbio: o "Volume Sem Compensação", que evidencia a perda bruta de volume ocasionada pelos eventos de mortalidade; e o "Volume Real (Com Compensação)", quantificando o grau de sucesso da resiliência florestal promovida pelo *FLET*.

O sistema expõe a "Demografia da Floresta Remanescente". Este módulo segmenta a matriz cartesiana em três subpopulações distintas: (i) *Intactas*, árvores que não possuem falhas em sua Vizinhança de Moore; (ii) *Vizinhas*, a subpopulação ativamente engajada na resposta compensatória, exposta diretamente às zonas de alívio competitivo; e (iii) *Mortas*, que representam o grau de liberação espacial.

Figura 4 - Painéis iniciais do dashboard de resultados do *ForestSIM*, apresentando as métricas de síntese produtiva (comparativo volumétrico entre os cenários simulados) e a demografia estratificada da floresta remanescente (árvores intactas, vizinhas e mortas).



4.1.2.2. Esforço de crescimento e otimização do fator compensatório

O painel "Esforço de Crescimento" materializa a convergência entre o *backend* de otimização matemática e a biometria florestal (Figura 5). Após o processamento da mortalidade, este módulo tem a finalidade de explicitar o motor preditivo da resiliência e quantificar a magnitude da resposta compensatória exigida da floresta remanescente.

No cabeçalho do painel, o sistema exhibe o valor exato do Fator Compensatório (β_3), que corresponde à raiz matemática otimizada pelo algoritmo de convergência do *SciPy*. A interface renderiza simultaneamente a equação não linear parametrizada para o incremento diamétrico. Esta exibição em notação algébrica reforça a arquitetura de "caixa-branca" do *software*, evidenciando como o β_3 atua como um coeficiente

multiplicador sobre a métrica espacial de liberação (*FLET*) no expoente da função de projeção.

Para transcender a abstração do coeficiente adimensional β_3 e fornecer uma métrica de utilidade prática imediata ao silvicultor, o simulador isola a subpopulação de árvores *Vizinhas* e calcula o crescimento compensatório despendido. O sistema processa a diferença (*delta*) entre as médias dendrométricas dessas mesmas árvores nos cenários de projeção com e sem a atuação do fator compensatório.

Conforme evidenciado pelos laudos do sistema, a ferramenta informa o incremento percentual e absoluto demandado. Em simulações de cenários, o painel destaca, por exemplo, que para atingir a recuperação integral do talhão, a subpopulação limítrofe as áreas de falha necessitaram expandir seu diâmetro (*dap*) em +4,77% e o volume individual em +10,62% acima da taxa natural de crescimento esperada para o período.

Figura 5 - Painel interativo de "Esforço de Crescimento" do simulador *ForestSIM*, detalhando o Fator Compensatório (β_3) numérico otimizado, a equação não linear de projeção diamétrica e o incremento percentual e absoluto demandado das árvores sobreviventes.

3. Esforço de Crescimento (Fator de Compensação: 0.042834250522)

A projeção do diâmetro das árvores vizinhas foi alterada pela inclusão do termo aditivo compensatório:

$$dap_2 = dap_1 \cdot e \left[\beta_1 (Idade_2^{\beta_2} - Idade_1^{\beta_2}) + \beta_3 \cdot FLET \right]$$

Nesta formulação, o parâmetro B3 atua como um multiplicador de resiliência sobre o **Fator de Liberação Espaço-Temporal** (*FLET*), capitalizando o espaço extra deixado pelas clareiras e o tempo decorrido desde a mortalidade.

Para atingir a resiliência produtiva do talhão, as **árvores vizinhas sobreviventes** precisaram crescer em média:

- + 10.62% em **Volume** (Média subiu de 0.3373 m³ para 0.3731 m³).
- + 4.77% em **Diâmetro (dap)** (Média subiu de 17.43 cm para 18.26 cm).

4.1.2.3. Evolução dendrométrica e transição de classes

Para demonstrar a coerência do crescimento compensatório, o sistema apresenta a evolução temporal dos atributos dendrométricos das árvores mapeadas como vizinhas. Os gráficos de linha gerados comparam a trajetória de crescimento

destas árvores sob plena competição (*Cenário Sem Compensação*) contra o pulso de crescimento estimulado pelas aberturas (*Cenário Com Compensação*) (Figura 6).

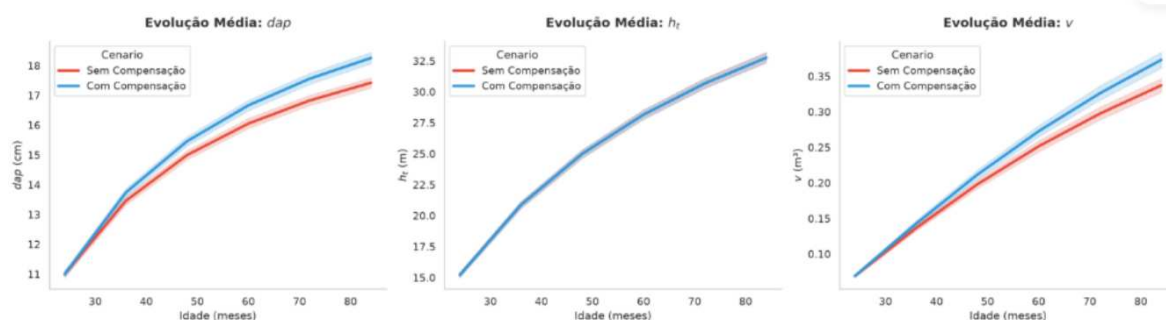
Observa-se nos laudos visuais a nítida bifurcação (formação de um delta de crescimento) para o *dap* e volume. O *ForestSIM* aponta trajetórias sobrepostas (idênticas) para a variável Altura Total (h_t). Esse comportamento algorítmico corrobora princípios clássicos de silvicultura quantitativa, que postulam que o crescimento em altura dominante em povoamentos de *Eucalyptus* é governado pela capacidade produtiva do sítio e insensível a variações pontuais de densidade ou liberação de espaço lateral (OLIVER; LARSON, 1996).

Essa aceleração diamétrica contínua induz a uma migração populacional perceptível no "Histograma de Transição de Classes Diamétricas", exibindo as árvores compensadas (em azul) avançando precocemente para centros de classe superiores em idades subsequentes ao evento de mortalidade.

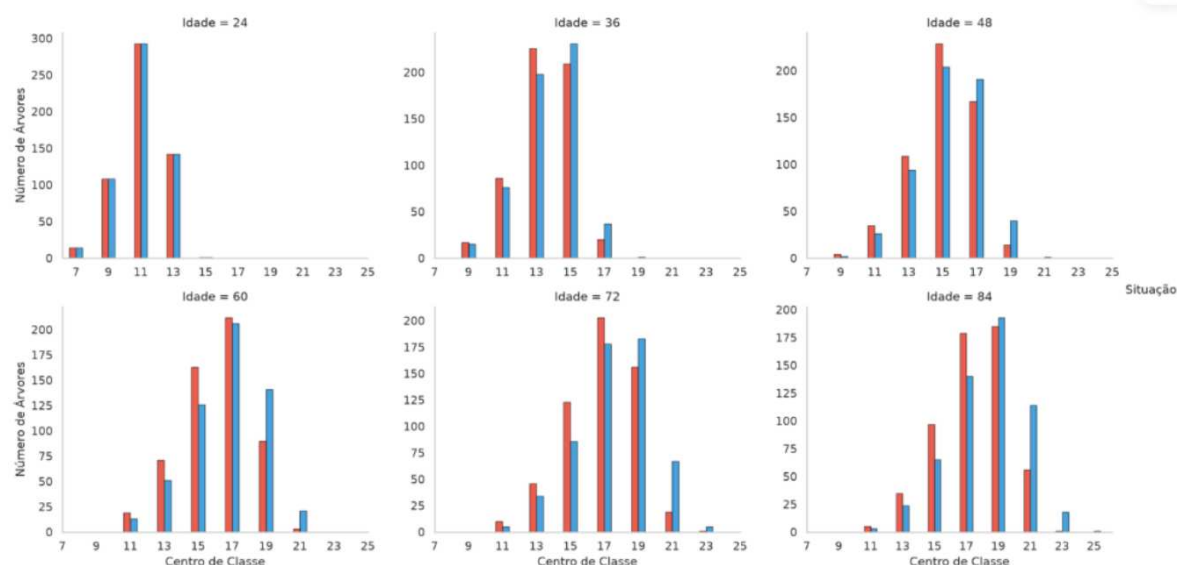
Figura 6 - Painéis de evolução dendrométrica e transição de classes para a subpopulação de árvores vizinhas. Os gráficos de linha superiores evidenciam a bifurcação de crescimento no diâmetro (dap) e volume (v), contrastando com a invariabilidade temporal da altura total (h_t). Os histogramas inferiores demonstram a migração estrutural acelerada dos indivíduos sob resiliência espacial para centros de classe superiores ao longo do horizonte simulado.



4. Evolução Dendrométrica das Vizinhas



Transição de Classes Diamétricas



4.1.2.4. Mapeamento espacial

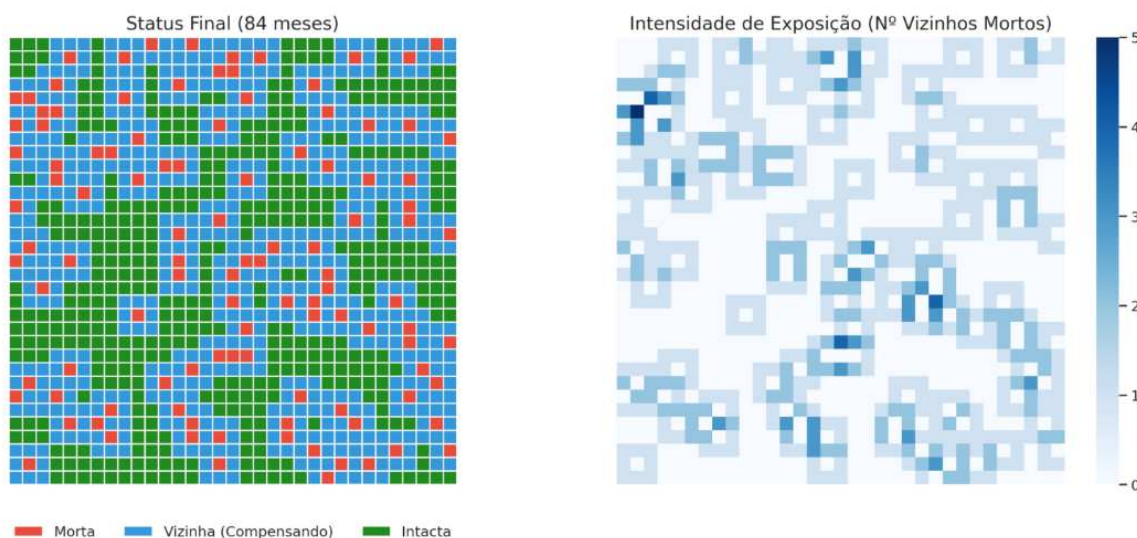
A consolidação espacial do modelo é evidenciada no mapeamento cartográfico do povoamento (Figura 7). Utilizando mapas de calor bidimensionais, a matriz numérica é traduzida em um *layout* visual que permite ao pesquisador inspecionar a agregação espacial das falhas.

O "Status Final" classifica a malha nas cores padronizadas da demografia. Nota-se que os indivíduos classificados como *Vizinhos* formam fronteiras precisas ao

redor das áreas de árvores *Mortas*, enquanto as zonas *Intactas* ocupam os núcleos adensados e não perturbados. O segundo mapa, "Intensidade de Exposição", revela a capilaridade da liberação competitiva, utilizando um gradiente monocromático para explicitar árvores sobreviventes que compartilham fronteira com múltiplas falhas localizadas, caracterizando as zonas de máximo *FLET*.

Figura 7 - Mapeamento espacial da floresta simulada por meio de mapas de calor (*heatmaps*). À esquerda, o painel de Status Final ilustra a segregação espacial do dossel em árvores mortas, vizinhas e intactas; à direita, o gradiente de Intensidade de Exposição quantifica o número de falhas adjacentes a cada indivíduo remanescente.

5. Matriz Espacial e Cicatrizes de Mortalidade



4.1.2.5. Exportação de dados transversais

Como exigência para validações estatísticas independentes, o *software* não atua como ambiente de restrição de dados. Ao final do processamento, a arquitetura provê a exportação automatizada da malha espaço-temporal estruturada em um arquivo plano (*Comma-Separated Values* - CSV). Os dados são organizados no padrão de estrutura longa (*Long Format*) (WICKHAM, 2014), contendo a identidade da árvore (Coordenadas XY da malha), atributos biométricos em cada idade avaliada, o status demográfico e a métrica do Índice de Pressão de Vizinhança (*IPV*). Essa funcionalidade encerra o ciclo de simulação, fornecendo matrizes brutas compatíveis

com linguagens avançadas de estatística (como *R* ou *SAS*) para desdobramentos de pesquisa.

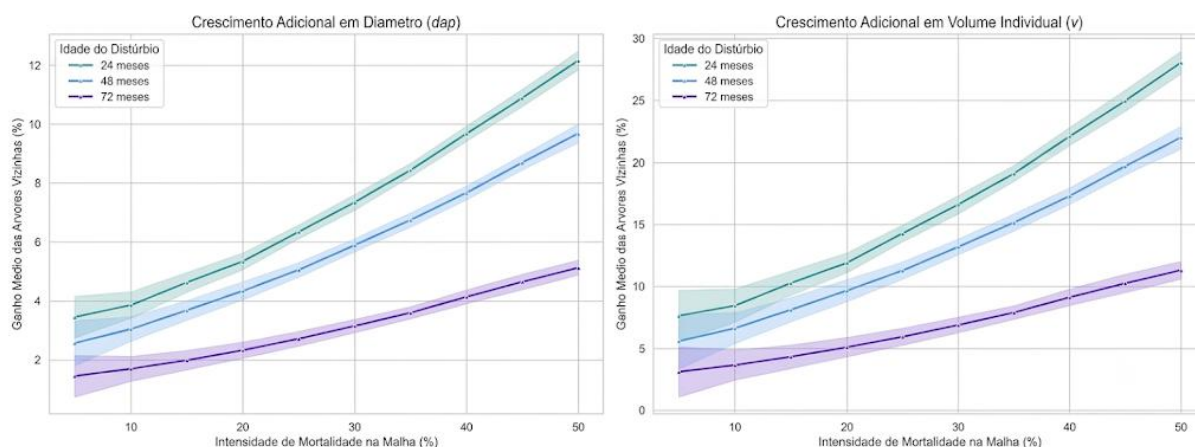
4.2. Estudo de caso: predição da resiliência produtiva sob múltiplos cenários de perturbação

Para validar a coerência biológica e a robustez algorítmica do *ForestSIM*, conduziu-se um estudo de caso utilizando a base de dados empírica descrita no Capítulo 1. Os modelos alométricos e de crescimento nativos do simulador foram ajustados para capturar o comportamento médio da cultura de *Eucalyptus*, permitindo inferências generalistas sobre a dinâmica da floresta. O povoamento virtual foi estruturado sob um arranjo espacial de 3,0 m × 3,0 m e o fator compensatório empírico (β_3) foi previamente fixado no motor de projeção. O sistema foi então submetido a uma rotina fatorial de Monte Carlo (100 iterações por cenário), com as respostas dendrométricas consolidadas e avaliadas em uma idade final de rotação estipulada em 84 meses. O delineamento algorítmico cruzou diferentes idades de ocorrência (24, 48 e 72 meses) com intensidades progressivas de mortalidade estocástica na malha espacial (5% a 50%).

4.2.1. Dinâmica alométrica e a resposta compensatória individual

O primeiro eixo de validação do modelo recai sobre a capacidade preditiva do crescimento individual nas bordas das zonas de mortalidade. A Figura 8 ilustra a magnitude da capacidade de resposta das árvores categorizadas pelo algoritmo como "Vizinhas" (indivíduos adjacentes a pelo menos uma falha), quantificando o ganho dendrométrico percentual líquido em relação ao cenário sem distúrbio.

Figura 8 - Incremento compensatório médio em diâmetro (*dap*) e volume individual (*v*) exigido das árvores vizinhas sob cenários estocásticos de mortalidade.



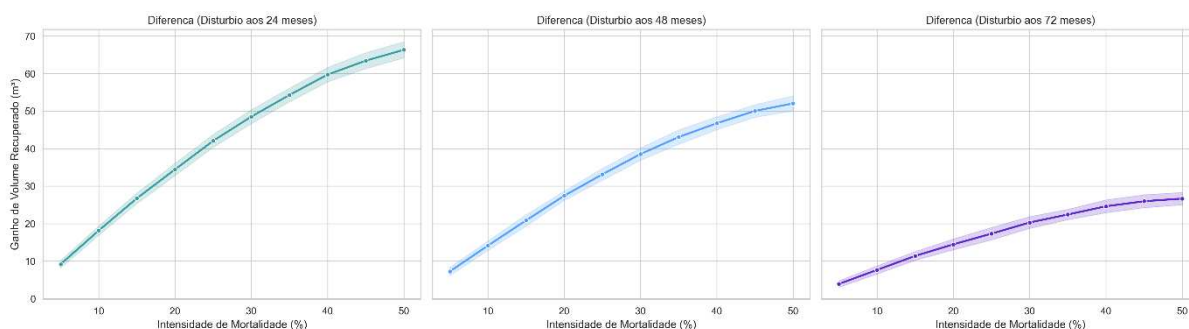
A análise das trajetórias revela uma coerência com os princípios de preempção de recursos postulados por Oliver e Larson (1996). Biologicamente, a mortalidade de um indivíduo gera um alívio microambiental imediato, reduzindo a fricção de copas e a competição radicular. O motor matemático do *ForestSIM*, tracionado pela interação entre o Índice de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*) e o parâmetro β_3 , traduz esse vazio competitivo em crescimento secundário. Nota-se que o ganho em volume (*v*) atinge patamares superiores (aproximando-se de 28% em cenários de alta mortalidade e precoces) em comparação ao ganho diamétrico (*dap*), máximo de ~12%). Essa assimetria algorítmica reflete o modelo volumétrico de Schumacher e Hall, onde o crescimento em *dap* é exponencializada na estimativa de volume.

A Figura 8 válida a mecânica transiente do *FLET*. Distúrbios precoces (24 meses) propiciam uma extensa janela cronológica para que as árvores adjacentes capitalizem os recursos disponibilizados (BINKLEY, 2004). Em contrapartida, distúrbios tardios (72 meses) comprimem a utilidade temporal do alívio competitivo, resultando em respostas marginais, refletidas na inclinação achatada da curva inferior.

4.2.2. Limites biológicos de suporte e saturação do vazio ecológico

Para compreender o limite de conversão dos recursos disponibilizados em volume, o simulador isolou a diferença absoluta de volume recuperado (Cenário com Resiliência deduzido do Cenário sem Resiliência), estratificando os resultados pela cronologia do distúrbio (Figura 9).

Figura 9 - Volume absoluto de madeira (m^3) recuperado pelo povoamento florestal devido ao alívio competitivo em diferentes idades de distúrbio.



O comportamento assintótico observado na Figura 9, especialmente no painel de 24 meses, evidencia a consistência biológica do modelo. Abordagens preditivas estritamente lineares assumiriam que, quanto maior a mortalidade, contínuo e ilimitado seria o ganho das sobreviventes. No entanto, o modelo autorregressivo integrado ao *ForestSIM* impõe limites de crescimento intrínsecos à capacidade produtiva do sítio (PRETZSCH, 2009).

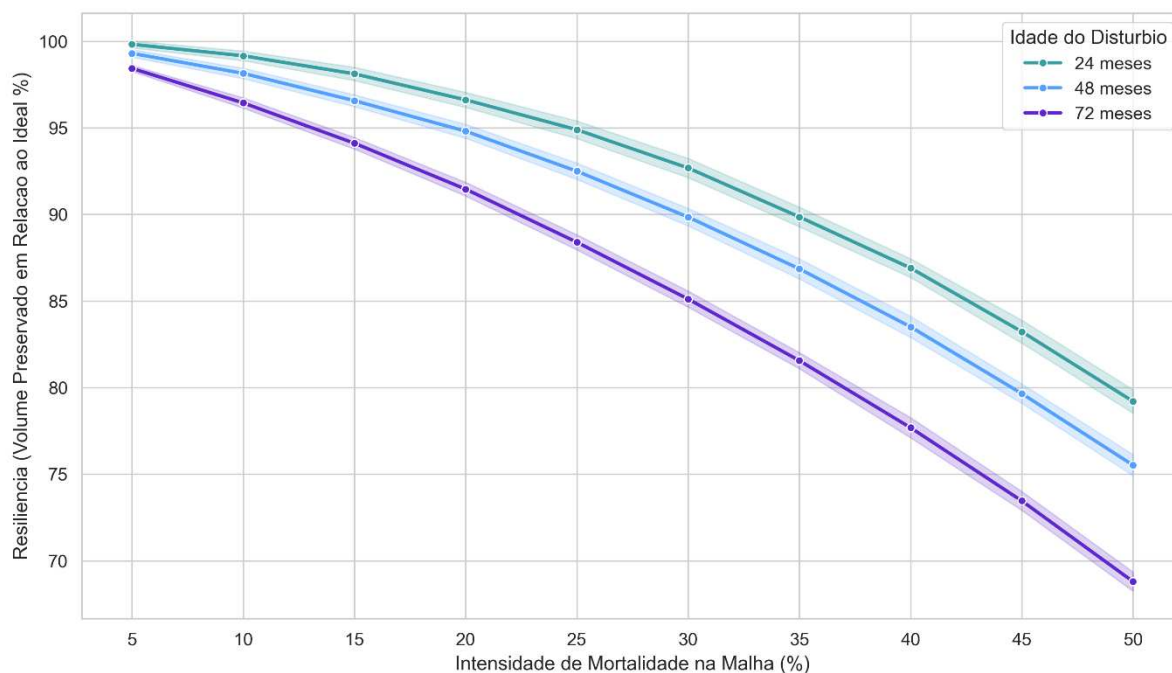
Quando a intensidade de mortalidade na malha excede os 30-40%, a curva de recuperação volumétrica sofre uma nítida inflexão, indicando saturação. A esta altura, as áreas de falha tornam-se tão vastas que as copas e os sistemas radiculares das poucas árvores remanescentes não possuem arquitetura física suficiente para interceptar todos os recursos ociosos. O painel de 72 meses comprova a insensibilidade do povoamento em idades próximas à rotação: a floresta perde a capacidade de amortecimento, e o volume compensado restringe-se a ínfimos acréscimos, provando que a mortalidade tardia resulta em perda de produção.

4.2.3. Resiliência produtiva e a captura do risco estocástico

O ápice inferencial do *ForestSIM* consolida-se na avaliação da resiliência produtiva em nível populacional (escala de hectare), confrontando a produção final obtida contra a meta teórica de uma floresta ideal (100% de sobrevivência).

A Figura 10 sintetiza o impacto silvicultural do momento da falha. Distúrbios de até 10% aos 24 meses são anulados pelo povoamento (resiliência de ~98%), comprovando o conceito de "autodesbaste compensatório" tolerável na silvicultura clonal (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Figura 10 - Resiliência produtiva do povoamento aos 84 meses, expressa pela proporção de volume preservado frente a múltiplos cenários de mortalidade espacial.



Entretanto, a característica mais contundente gerada pelo algoritmo é a expansão progressiva das bandas de desvio padrão (sombras ao redor das linhas) à medida que a intensidade do distúrbio aumenta. Este espalhamento da variância é o produto direto das iterações de Monte Carlo acopladas ao Índice de Pressão de Vizinhança (*IPV*). O modelo demonstra que uma mortalidade de 30% não possui um impacto único; seu efeito é governado pela distribuição espacial da mortalidade. Se as 100 iterações de Monte Carlo agruparem essas falhas em "reboleiras" (agregadas), o efeito de borda é minimizado e o rendimento despenca (limite inferior). Se a mesma taxa de 30% for distribuída aleatoriamente, intercalando árvores vivas e mortas, o *FLET* atinge sua máxima capilaridade geométrica, elevando a recuperação volumétrica (limite superior).

Este resultado consolida a premissa de que sistemas estáticos de prognose, baseados unicamente em médias por hectare, são cegos à distribuição espacial e subestimam o risco silvicultural. A arquitetura espacialmente explícita do *ForestSIM*, portanto, demonstra-se vital para a modelagem realista do manejo de riscos em plantios comerciais.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento e a validação do *ForestSIM* atestam a exequibilidade de transpor a complexidade dos Modelos de Árvore Individual Espacialmente Explícitos (MAIEE) para um ambiente computacional dinâmico, interativo e de arquitetura 'caixa-branca'. O sistema supera as tradicionais barreiras de usabilidade que afastam modelos preditivos avançados do manejo florestal operacional, entregando um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) capaz de modelar e quantificar, em tempo real, a resiliência produtiva do povoamento florestal.

As análises de resposta processadas pelo motor algorítmico demonstraram alta coerência biológica. O modelo atestou que a magnitude do crescimento compensatório não é um processo uniforme, sendo primordialmente impulsionada pelo crescimento em diâmetro da subpopulação sobrevivente diretamente limítrofe às aberturas localizadas, enquanto o crescimento em altura não sofre alteração pelo alívio competitivo adjacente.

A aplicação do simulador em estudos de caso estocásticos de Monte Carlo evidenciou que a resiliência do povoamento é governada por componentes espaço-temporais. Distúrbios precoces acoplados a mortalidades de baixa intensidade (até 10%) permitem a quase integral recuperação do volume perdido, configurando uma zona de tolerância silvicultural. Em contrapartida, distúrbios tardios limitam a atuação do Fator de Liberação Espaço-Temporal (*FLET*), inviabilizando a compensação. Ademais, o delineamento fatorial mapeou o risco espacial latente na matriz florestal, demonstrando que a dispersão agregada de falhas (reboleiras) compromete o rendimento produtivo muito mais do que mortalidades espacialmente aleatórias da mesma intensidade, validando a necessidade de abordagens dependentes da distância para o planejamento de riscos.

Como limitação inerente ao escopo do atual desenvolvimento, o sistema não mensura explicitamente a competição por recursos e as interações de facilitação entre as matrizes clonais, as quais poderiam impor restrições adicionais à resposta compensatória simulada. Trabalhos futuros devem concentrar-se na integração de módulos econômicos para a precificação transversal, visando a otimização do Valor Presente Líquido a partir da transição de classes diamétricas compensadas, bem como no acoplamento de rotinas de desbaste, expandindo o *ForestSIM* para atuar plenamente no delineamento da silvicultura de precisão.

REFERÊNCIAS

- BAILEY, R. L.; DELL, T. R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973.
- BINKLEY, D. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. **Forest Ecology and Management**, v. 190, n. 2-3, p. 265-271, 2004.
- BRENT, R. P. **Algorithms for Minimization without Derivatives**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1973.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. Dordrecht: Springer, 2012.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas. 6. ed.** atualizada e ampliada. Viçosa: Editora UFV, 2025.
- HARRIS, C. R.; MILLMAN, K. J.; VAN DER WALT, S. J.; GOMMERS, R.; VIRTANEN, P.; COURNAPEAU, D.; WIESER, E.; TAYLOR, J.; BERG, S.; SMITH, N. J.; KERN, R.; PICUS, M.; HOYER, S.; VAN KERKWIJK, M. H.; BRETT, M.; HALDANE, A.; FERNÁNDEZ DEL RÍO, J.; WIEBE, M.; PETERSON, P.; GÉRARD-MARCHANT, P.; SHEPPARD, K.; REDDY, T.; WECKESSER, W.; ABBASI, H.; GOHLKE, C.; OLIPHANT, T. E. Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, n. 7825, p. 357-362, 2020.
- HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007.
- KANGAS, A.; KANGAS, J.; KURTTLA, M. **Decision Support for Forest Management 2. ed.** Dordrecht: Springer, 2015.
- MCKINNEY, W. **Data structures for statistical computing in python**. In: PROCEEDINGS OF THE 9TH PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE. Austin: SciPy, 2010. p. 51-56.
- MEDHURST, J. L.; BEADLE, C. L.; NEILSEN, W. A. Early-age and later-age thinning affects growth, dominance, and clearwood yield in *Eucalyptus nitens*. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 2, p. 187-197, 2001.
- OLIVER, C. D.; LARSON, B. C. **Forest Stand Dynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- PIENAAR, L. V.; SHIVER, B. D. Survival functions for site-prepared slash pine plantations in the flatwoods of Georgia and northern Florida. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 5, n. 2, p. 59-62, 1981.

PORTÉ, A.; BARTELINK, H. H. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. **Ecological Modelling**, v. 150, n. 1-2, p. 141-188, 2002.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model**. Berlin: Springer, 2009.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests**. Wallingford: CAB International, 1994.

VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; HABERLAND, M.; REDDY, T.; COURNAPEAU, D.; BUROVSKI, E.; PETERSON, P.; WECKESSER, W.; BRIGHT, J.; VAN DER WALT, S. J.; BRETT, M.; WILSON, J.; MILLMAN, K. J.; MAYOROV, N.; NELSON, A. R. J.; JONES, E.; KERN, R.; LARSON, E.; CAREY, C. J.; POLAT, İ.; FENG, Y.; MOORE, E. W.; VANDERPLAS, J.; LAXALDE, D.; PERKTOLD, J.; CIMRMAN, R.; HENRIKSEN, I.; QUINTERO, E. A.; HARRIS, C. R.; ARCHIBALD, A. M.; RIBEIRO, A. H.; PEDREGOSA, F.; VAN MULBREGT, P. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, p. 261-272, 2020.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW JR, J. A.; VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.

WICKHAM, H. Tidy data. **Journal of Statistical Software**, v. 59, n. 10, p. 1-23, 2014.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação estabelece um contínuo metodológico e conceitual entre a biométrica florestal e a engenharia de *software* aplicada ao manejo florestal. O Capítulo 1, com base em evidências empíricas modelada via regressão não paramétrica espacial (LOESS) e Modelos Lineares de Efeitos Mistos (LMM), que a mortalidade florestal não atua como um mero redutor linear de estoque, mas como um catalisador transiente de redistribuição de recursos. A formulação do Fator de Liberação Espaço-Temporal (FLET) comprovou que o crescimento compensatório se dá no crescimento secundário e é governado pela arquitetura espacial da falha, pela capacidade produtiva do sítio e pela posição fitossociológica prévia das árvores adjacentes. O Capítulo 2 materializou esses resultados e conclusões no desenvolvimento do *ForestSIM*, um simulador *web* espacialmente explícito. Ao acoplar o FLET e o Índice de Pressão de Vizinhança (IPV) a um motor de otimização estocástica, a ferramenta traduziu os padrões biológicos observados no campo em um laboratório virtual preditivo. A integração desses capítulos evidencia que a resiliência produtiva do povoamento é influenciada pelo arranjo espacial, provando que a transição de premissas globais não espaciais para modelos dependentes da distância é essencial para a estimativa precisa do crescimento.

A convergência entre os dados de campo (Capítulo 1) e as saídas do *ForestSIM* (Capítulo 2) atesta a fidelidade biométrica do simulador. Empiricamente, os LMMs evidenciaram uma divergência alométrica estrita: o alívio competitivo incide substancialmente sobre o crescimento secundário (dap), mantendo o crescimento primário (h_t) pouco alterado. O simulador reproduziu essa resiliência assimétrica com exatidão, acoplando o termo compensatório (β_3^{FLET}) estritamente ao modelo autorregressivo de diâmetro, resultando em trajetórias hipsométricas sobrepostas e trajetórias diamétricas bifurcadas para as árvores vizinhas às zonas de alívio competitivo.

Quantitativamente, o modelo vai além da reprodução de dados empíricos ao refinar a análise para a escala da árvore individual e de sua vizinhança espacial. Essa precisão é validada pela coerência das respostas compensatórias: no Capítulo 1, o ganho médio populacional em sítios de alta produtividade foi de +9,9% aos 6 anos; no Capítulo 2, a intensa liberação competitiva após mortalidade precoce e severa gerou ganhos de até +28% nas árvores adjacentes. Essa diferença de magnitude prova que

o simulador calibra corretamente os limites biológicos locais antes de extrapolá-los para a produtividade por hectare.

A constatação empírica mais contraintuitiva do Capítulo 1 foi a dualidade da resposta à mortalidade: a falha localizada impacta negativamente as árvores dominadas, penalizando-as com uma supressão adicional, enquanto beneficia exclusivamente os indivíduos dominantes. O simulador expande e explica essa dinâmica ao integrar o modelo autorregressivo de *dap* e utilizar o Índice de Posição de Vizinhança (IPV) como moderador probabilístico. Na simulação, indivíduos que já exerciam a dominância estrutural apresentam IPV superior e, portanto, sobrevivem ao sorteio de Monte Carlo e convertem o alívio competitivo projetado pelo FLET em incremento.

A dinâmica dessa interação revela que o espaço físico ocioso não se converte automaticamente em biomassa se a capacidade estrutural da árvore vizinha não for suficiente para interceptá-lo. A simulação mostrou que a eficiência de aproveitamento do alívio competitivo retrocede com o tempo decorrido desde o distúrbio (decaimento do FLET), simulando de forma consistente o preenchimento gradual do espaço de crescimento que inviabiliza o crescimento compensatório a longo prazo.

O *ForestSIM* provou sua consistência preditiva ao não linearizar os ganhos perante intensidades crescentes de distúrbio. Baseando-se nas premissas de capacidade de suporte do Capítulo 1, o simulador estipulou limites produtivos realistas. Por meio da modelagem estocástica, as curvas de recuperação de volume saturam quando a mortalidade na malha atinge o limiar de 30% a 40%. Nesse patamar, as poucas árvores remanescentes não possuem capacidade estrutural para preencher o espaço de crescimento ocioso a tempo, convertendo o alívio competitivo em quebra irrecuperável de produção. Essa saturação atesta que a parametrização do software está ancorada em princípios da silvicultura.

A presente pesquisa consolida um avanço duplo na biometria florestal. Cientificamente, evidencia de forma quantitativa a heterogeneidade da resposta produtiva ao alívio competitivo, demonstrando que a competição em plantios de *Eucalyptus* é estritamente assimétrica. Tecnicamente, supera as barreiras operacionais dos MAIEE, entregando um ambiente transparente onde um solver numérico processa a otimização matemática de resiliência em tempo real, tornando a simulação espacial operacionalmente acessível.

Para a silvicultura de precisão, a implicação desta dissertação reside na quantificação do risco estocástico. Simulações sistêmicas do Capítulo 2 revelaram que distúrbios da mesma intensidade ($\pm 30\%$) geram rendimentos diferentes em função do padrão de distribuição da mortalidade. Falhas dispostas em "reboleiras" anulam o efeito de borda do crescimento compensatório, reduzindo a eficiência do povoamento ao seu limite inferior de amortecimento. Esse comportamento invalida inventários estáticos baseados unicamente na mortalidade agregada por hectare, que tendem a superestimar a recuperação da floresta. Gestores podem utilizar o sistema desenvolvido para decidir com segurança entre conduzir a rotação contando com a resiliência compensatória (em casos de mortalidade precoce e dispersa) ou intervir em casos de mortalidade agregada e/ou tardia.

Embora robusta, a modelagem espacial adotada lida com incertezas intrínsecas, visto que a competição por recursos edáficos e a complexidade das interações de micro-sítio são abstraídas matricialmente pela área basal, servindo como uma aproximação biométrica sem mensuração direta do sistema radicular. Além disso, as interações interespecíficas inerentes a povoamentos mistos não foram parametrizadas neste primeiro delineamento.

A arquitetura modular do simulador fundamenta sua expansão para módulos econômicos, viabilizando a valoração baseada na transição das árvores compensadas para classes diamétricas de maior valor agregado. Como trabalhos futuros, projeta-se o acoplamento de rotinas de desbaste seletivo e a integração com dados de sensoriamento remoto, consolidando as previsões de resiliência espacial como uma ferramenta operacional no planejamento florestal de precisão.

REFERÊNCIAS GERAIS

- BINKLEY, D. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. **Forest Ecology and Management**, v. 190, n. 2-3, p. 265-271, 2004.
- BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; BAUERÇE, W. L.; RYAN, M. G. Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1704–1713, 2010.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. Dordrecht: Springer, 2012.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas. 6.ed.** atualizada e ampliada. Editora UFV: Viçosa, Brasil, 2025.
- CHIN, A. R. O.; HILLE RIS LAMBERS, J.; FRANKLIN, J. F. Context matters: Natural tree mortality can lead to neighbor growth release or suppression. **Forest Ecology and Management**, v. 529, p. 120735, 2023.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The State of the World's Forests 2022: **Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies**. Roma: FAO, 2022.
- FORRESTER, D. I. Linking Forest growth with stand structure: Tree size inequality, tree growth or resource partitioning and the asymmetry of competition. **Forest Ecology and Management**, v. 447, p. 139-157, 2019.
- FORRESTER, D. I.; ELMS, S. R.; BAKER, T. G. Tree growth-competition relationships in thinned Eucalyptus plantations vary with stand structure and site quality. **European Journal of Forest Research**, v. 132, n. 2, p. 241-252, 2013.
- GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013.
- KANGAS, A.; KANGAS, J.; KURTTILA, M. **Decision Support for Forest Management 2. ed.** Dordrecht: Springer, 2015.
- OLIVER, C. D.; LARSON, B. C. **Forest Stand Dynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

PORTÉ, A.; BARTELINK, H. H. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. **Ecological Modelling**, v. 150, n. 1-2, p. 141-188, 2002.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model**. Berlin: Springer, 2009.

RESENDE, R. T. **Micro- and macro-site variants on genotype by environment interaction in *Eucalyptus* spp.** 2019. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2019.

SCHWERZ, F.; DOURADO NETO, D. D.; CARON, B. O.; NARDINI, C.; SGARBOSSA, J.; ELOY, E.; BEHLING, A.; ELLI, E. F.; REICHARDT, K. Biomass and potential energy yield of perennial woody energy crops under reduced planting spacing. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1238-1250, 2020.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.

WEINER, J. Asymmetric competition in plant populations. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 5, n. 11, p. 360-364, 1990.